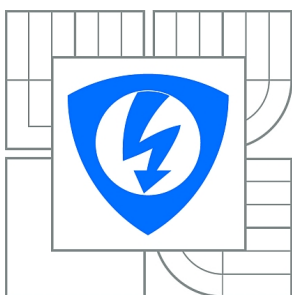




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LAMPOVÝ MIKROFONNÍ PŘEDZESILOVAČ

TUBE MICROPHONE PREAMPLIFIER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ADAM ČACKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. LUBOMÍR BRANČÍK, CSc.

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Adam Čacký

ID: 115160

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Lampový mikrofonní předzesilovač

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proved'te návrh blokového a obvodového zapojení elektronkového mikrofonního předzesilovače s nezávislým nastavením lampového zesílení a výstupní hlasitosti. Předzesilovač bude doplněn nastavitelnými vstupy i výstupy, indikátorem vstupních úrovní, fantomovým napáječem 48 V pro kondenzátorové mikrofony, přepínačem zisku a možností otočení fáze signálu. Dále proved'te návrh interní zdrojové jednotky pro napájení všech obvodů předzesilovače. Parametry hlavních částí navrženého zařízení analyzujte v simulačním softwaru PSpice.

V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu zařízení. Předzesilovač realizujte formou funkčního prototypu a experimentálním měřením v laboratoři ověřte jeho činnost. Zjištěné charakteristiky zpracujte formou standardního protokolu a porovnejte je s výsledky počítačových simulací. Na závěr objektivně zhodnoťte dosažené parametry realizovaného zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN – technická literatura, 2003.

[2] BALLOU, G. Handbook for Sound Engineers, 3/E. Oxford: Focal Press, 2005.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 21.5.2015

Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem mikrofonního předzesilovače využívajícího jako hlavní zesilovací prvek elektronku. Součástí práce jsou teoretické předpoklady pro optimální návrh a realizaci obvodového zapojení, porovnání vlastností užitých součástek a výsledné parametry modelovaného zařízení. Součástí je také návrh zdrojové jednotky pro napájení všech částí předzesilovače. Získané výsledky jsou doprovázeny provedenými simulacemi a laboratorním měřením klíčových parametrů navrženého zařízení.

ABSTRACT

The theme of the master's thesis is design a microphone preamplifier which uses vacuum tube as a main amplifying element. Part of the work is theoretical assumptions for the optimal design and implementation of peripheral involvement, comparing the properties of components used and the resulting parameters of modeled device. The thesis also includes a proposal of the source unit for supplying all parts of the preamplifier. The results are accompanied by circuit simulations and laboratory measurements of the main parameters of the designed device.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektronka, trioda, mikrofon, operační zesilovač, předzesilovač, zisk, výkon, stabilizace, zkreslení, limitace, napájecí zdroj, indikátor vybití.

KEYWORDS

Vacuum tube, triode, microphone, operational amplifier, preamplifier, gain, power, stabilization, distortion, limitation, power supply, gain indicator.

ČACKÝ, A. *Lampový mikrofonní předzesilovač*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2015. 53 s., 27 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Lampový mikrofonní předzesilovač jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Lubomíru Brančíkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Místo

.....
podpis autora(-ky)

OBSAH

Seznam obrázků	iii
Úvod	1
1 Mikrofonní předzesilovače	3
1.1 Trendy v audiotechnice.....	4
1.2 Koncepce lampových zesilovačů.....	5
1.3 Zkreslení elektroakustických zařízení	6
1.3.1 Harmonické zkreslení.....	6
1.3.2 Zkreslení zesilovacích prvků	7
2 Problematika elektronek	10
2.1 Princip elektronky.....	10
2.2 Elektrické vlastnosti elektronky	11
2.3 Nevýhody elektronek.....	15
2.4 Značení a druhy elektronek.....	16
2.5 Základní zapojení zesilovacího stupně.....	18
3 Napájení a žhavení elektronek	20
3.1 Napájecí napětí elektronek.....	20
3.2 Žhavení elektronek.....	21
4 Návrh zdrojové napájecí jednotky	22
4.1 Návrh obvodu stabilizovaného zdroje žhavení.....	23
4.2 Návrh obvodu stabilizovaného napájecího zdroje.....	26
4.3 Návrh obvodu fantomového napájení.....	27
4.4 Napájení anod elektronky	31
5 Návrh signálové části zesilovače	33
5.1 Vstupní část zesilovače	34

5.1.1	Konektivita a ovládání funkcí	34
5.1.2	Mikrofonní/linkový kanál.....	35
5.1.3	Nástrojový kanál	36
5.2	Lampová část zesilovače	38
5.3	Koncová část předzesilovače	41
5.4	Indikátor vybuzení.....	43
6	Výsledné parametry zařízení	46
6.1	Elektrické parametry získané měřením	46
6.2	Průběhy získané měřením	47
7	Závěr	49
	Literatura	51
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	53
	Seznam příloh	54

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Blokové schéma navrhovaného mikrofonního předzesilovače.....	2
Obr. 2	Průběh zkreslení zesilovače	8
Obr. 3	Ukázka symetrického omezení – měkké [4].....	8
Obr. 4	Ukázka symetrické omezení – tvrdé [4]	9
Obr. 5	Elektronka (trioda); principiální náčrt konstrukce [9]	11
Obr. 6	Základní zapojení triody se společnou katodou	11
Obr. 7	Modelová charakteristika triody - ECC88 [12]	13
Obr. 8	Schematická značka elektronky.....	15
Obr. 9	Základní zapojení elektronkového zesilovacího stupně - osazeného triodou, zapojení se společnou katodou.....	18
Obr. 10	Typické zapojení integrovaného regulátoru napětí LM317.....	24
Obr. 11	Schéma zapojení obvodu regulátoru pro žhavení elektronky	25
Obr. 12	Schéma zapojení obvodu regulátoru pro stabilizovaný napájecí zdroj ..	27
Obr. 13	Schéma zapojení regulačního obvodu pro fantomové napájení	28
Obr. 14	Zjednodušené principiální schéma zapojení zdvojovače napětí	29
Obr. 15	Schéma zapojení kaskádního násobiče se čtyřmi stupni.....	30
Obr. 16	Simulované průběhy rozběhu obvodu zdroje fantomového napájení.....	31
Obr. 17	Schéma zapojení vstupní signálové části	34
Obr. 18	Schéma zapojení předzesilovací části pro kanál mikrofón/linka	36
Obr. 19	Průběh frekvenčních charakteristik mikrofonního kanálu pro různé hodnoty zisku	36
Obr. 20	Schéma zapojení předzesilovací části nástrojového kanálu	37
Obr. 21	Průběh frekvenčních charakteristik nástrojového kanálu pro různé hodnoty zisku	37
Obr. 22	Schéma zapojení elektronkové části předzesilovače	38
Obr. 23	Průběh frekvenčních charakteristik elektronkové části pro různé hodnoty zisku	39

Obr. 24	Průběh parametrické časové analýzy pro různé úrovně vstupního signálu elektronkové části zesilovače – měkká limitace.....	39
Obr. 25	Průběh parametrické časové analýzy pro různé úrovně vstupního signálu elektronkové části zesilovače – tvrdá limitace	40
Obr. 26	Průběh parametrické analýzy pro různé úrovně vstupního signálu s využitím funkce mix.....	41
Obr. 27	Schéma zapojení koncové části předzesilovače.....	42
Obr. 28	Průběh frekvenčních charakteristik koncové části pro různé hodnoty zisku	42
Obr. 29	Průběh parametrické časové analýzy pro různé úrovně vstupního signálu koncové části zesilovače - ostrá limitace.....	43
Obr. 30	Schéma zapojení obvodu indikátoru vybuzení.....	44
Obr. 31	Simulované průběhy v obvodu indikátoru vybuzení.....	45
Obr. 32	Měření výstupního dynamického rozsahu (vlevo) a rychlosti přeběhu (vpravo).....	47
Obr. 33	Výstupní signál v limitaci - měkké (vlevo), tvrdé (vpravo).....	47
Obr. 34	Demonstrace stability zesilovače (vlevo) a funkce mix (vpravo)	48
Obr. 35	Změřená modulová kmitočtová charakteristika předzesilovače.....	48
Obr. 36	Osazená DPS stabilizovaného zdroje žhavení.....	77
Obr. 37	Osazená DPS stabilizovaného napájecího zdroje	77
Obr. 38	Osazená DPS mikrofonního předzesilovače včetně osazeného ovládacího panelu a patice elektronky.....	78
Obr. 39	Čelní pohled na přístrojovou skříň předzesilovače	78
Obr. 40	Zadní pohled na přístrojovou skříň předzesilovače	79
Obr. 41	Vnitřní pohled do přístrojové skříně předzesilovače	79

ÚVOD

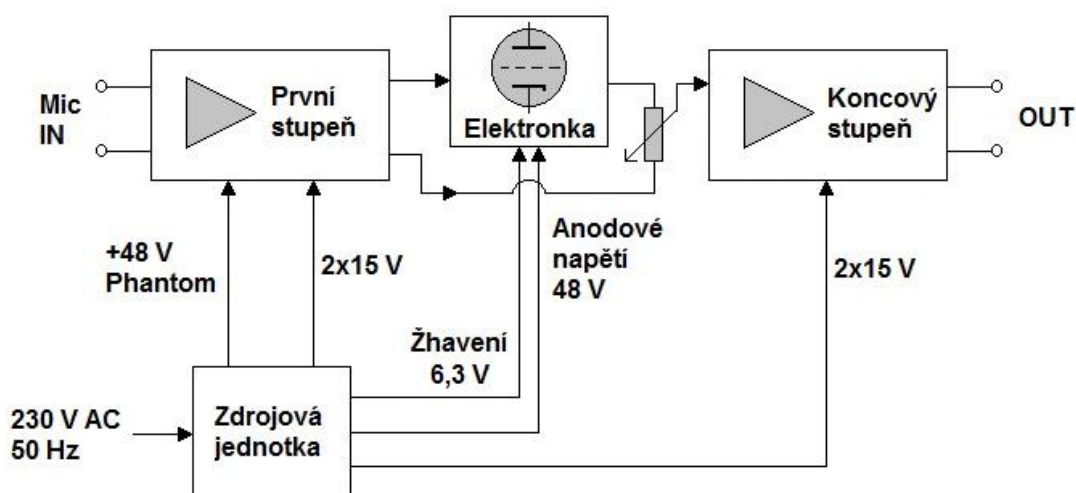
Mikrofonní zesilovače tvoří stále specifitější skupinu audio zařízení, jež se postupně vyvíjí pospolu s elektroakustickými měniči a dnes nenachází uplatnění jen v prostředích nahrávacích studií, jak tomu bylo v minulosti. V souvislosti s rozmachem nahrávacích zařízení v přenosné i stolní podobě, spolu s rostoucí poptávkou a dostupností tohoto typu elektroniky, zažívá celé odvětví nahrávací techniky postupný technický vývoj. Společně se zvyšujícími se nároky na funkčnost, variabilitu a uživatelskou obsluhu softwarové části nahrávacího procesu, se obdobné nároky kladou i na celý přenosový řetězec v hardwarové podobě. V tomto smyslu se ve velkém měřítku začíná uplatňovat myšlenka záměrného a relativně snadného ovlivnění nahrávaného zvuku pomocí elektronických prvků obsažených v cestě signálu směrem k jeho softwarovému zpracování.

Mikrofonní předzesilovače tedy dnes zastávají nejen svoji primární funkci prostého zesílení signálu vystupujícího z mikrofону, ale i pokročilé funkce jako například detekce, komprese, limitace, zkreslení či ekvalizace signálu, a to vše na analogové úrovni, tedy ještě před vlastním A/D převodem, přičemž všechny tyto funkce jsou uceleny do jednoho kompaktního zařízení.

Nejen díky různorodosti a parametrům elektroakustických měničů využitých u mikrofónů je třeba vlastní obvod mikrofonního předzesilovače navrhnout i pro vysokou kompatibilitu s dalšími připojitelnými zařízeními jako jsou hudební nástroje, klávesy, efektové procesory, mixážní pulty, ale dnes stále oblíbenější zařízení typu mobilního telefonu, přenosného přehrávače, sluchátek apod. Zároveň je kladen důraz na kvalitu výstupního signálu, která je z velké části ovlivněna použitými součástkami, topologií spojů i naladěním celého obvodového zapojení. Před návrhem a simulacemi vlastního elektronického obvodu je třeba zvážit účel a funkčnost modelovaného přístroje, množství připojitelných komponent, uživatelskou přívětivost, ale i ekonomické aspekty celé konstrukce.

Tato práce si klade za cíl nalezení kvalitního a funkčního zapojení obvodu mikrofonního předzesilovače s nastavitelnými vstupy, fantomovým napájením mikrofónů i s nastavením zisku, otočení fáze a výstupní hlasitosti, to vše doprovázeno teoretickým popisem dílčích bloků zesilovače, včetně interní napájecí jednotky. Vypracování projektu vychází také z provedených analýz a simulací signálové části obvodu vyhotovených v návrhovém simulačním softwaru Orcad Capture/PSpice.

Záměrem je vytvoření všech teoretických a obvodových podkladů pro praktický výstup projektu, kterým bude dotvoření všech konstrukčních podkladů a následná realizace navrženého zařízení formou funkčního prototypu. Zkonstruované zařízení by mělo splňovat vysoké nároky na kvalitu zvukového projevu a mohlo se tak i poměřovat s profesionální studiovou technikou, zároveň bylo svoji složitostí, potažmo svoji kompaktností, přívětivé a umožňovalo tak přímé porovnání s komerčně vyráběnými přístroji pro domácí použití. Blokové schéma navrhovaného zařízení vidíme na Obr. 1.



Obr. 1 Blokové schéma navrhovaného mikrofonního předzesilovače

Z důvodů návrhové objektivity jsou v práci uvedeny i porovnání katalogových údajů klíčových elektronických součástek, jejich chování v daném zapojení a nezbytný teoretický úvod především do problematiky užití elektronek v nízkofrekvenční audio technice. Všechny funkce modelovaného zařízení, spolu s dosaženými vlastnostmi, jsou shrnuty v závěru práce.

1 MIKROFONNÍ PŘEDZESILOVAČE

Obvody mikrofonních předzesilovačů obecně musí zpracovat celý dynamický rozsah mikrofону s přijatelnou hodnotou zkreslení, nízkým vlastním šumem, dostatečným zesílením, zároveň však musí poskytnout optimální výstupní výkon pro buzení dalšího zařízení, nabíjení kapacity propojovacích kabelů atp. Každý předzesilovač je vlastně sám o sobě převodníkem impedance, má tedy poměrně vysokou vstupní impedanci a přitom poskytuje dostatečný výstupní výkon a může tak být zatížen relativně malou impedancí připojenou na výstup [1].

Nezanedbatelným faktorem je pochopitelně i celkový zvukový charakter na patřičné úrovni. V případě, kdy je primární dosažení špičkových parametrů konstruovaného audio zařízení, není již nezbytně nutné v dnešní době použít složité, rozměrné a ekonomicky náročné řešení pomocí diskrétních zapojení. Poslední generace jakostních integrovaných zvukových obvodů již umí dosáhnout špičkových zvukových parametrů a nabízí i pokročilé funkce, které daleko předčí studiová zařízení z dob rozmachu těchto nahrávacích přístrojů.

Tyto integrované systémy navíc přináší mnohé další možnosti použití těchto obvodů díky použité miniaturizaci spolu s vysokou účinností vnitřních struktur. Stále častěji se však na trhu se zvukovou elektronikou objevují zařízení, které úspěšně kombinují výhody jakostních integrovaných obvodů (především operačních zesilovačů) a robustnost s výkonem diskrétních řešení [2].

Z pohledu jakosti zvukového projevu je pro návrh kvalitního zapojení obvodu předzesilovače vhodné uvážit zapojení zesilovače ve třídě A, které však při velké složitosti sebou nese i nízkou energetickou účinnost. Nicméně toto řešení odstraňuje přechodové zkreslení a poskytuje tak zvukově zcela nejlepší výsledky. Zde se však objevuje obecný problém – velmi kvalitní zapojení jsou k dispozici jen velmi ojediněle a navíc se v nich často objevují exotické součástky, jejichž cena je značně vysoká, nemluvě o obtížném dostání těchto obvodů na českém trhu [1].

1.1 Trendy v audiotechnice

Zvláštností dnes komerčně vyráběných audio zesilovačů, zejména mikrofonních, sluchátkových a kytarových, je stále častější výskyt dnes již archaické aktivní součástky – elektronky. Lampy, jak se tyto součástky jinak označují, disponují totiž i po desítkách let výroby velmi výhodnými vlastnostmi, které jsou i v moderní audiotechnice pořád ceněné a činí tak z elektronek stále důstojného konkurenta moderních polovodičových prvků. Je až s podivem, jak se v době masové výroby integrovaných audio obvodů a neustálé honbě za lepšími parametry, ruku v ruce vrací konstruktéři zesilovačů zpět k letitým osvědčeným zapojením, kdy elektronky v hudební technice ještě dominovaly. Vysvětlení pro tento zdánlivý paradox tkví v elektronických vlastnostech elektronky, jakými jsou velká vstupní impedance, malá vstupní kapacita, velmi široké přenášené pásmo, chování v limitaci, vysoký výstupní výkon a především pak charakter zkreslení (viz kapitola 1.3). Této problematice bude věnovaná větší pozornost v dalších kapitolách práce.

Dalším vysvětlením k časté obvodové implementaci elektronek je bezesporu i snaha výrobců továrně vyráběné zařízení s elektronkami „vyzdvihnout“ oproti zařízením osazovaným běžnými integrovanými obvody či tranzistory. I proto se elektronky hojně používají nejen u kytarových zesilovačů, ale i v efektových procesorech, mixážních pultech, harddiskových nahrávacích systémech, i ve sluchátkových a mikrofonních zesilovačích [3].

Samozřejmě nelze tvrdit, že za tím stojí jen komerční důvody. Mnohé dostupné poslechové srovnávací testy, při kterých byl poměřován výsledný zvukový projev zesilovače, jakožto i psycho-akustické vnímání zkreslení, prokázaly, že zesilovače osazené lampami jsou, a to pro hudební účely k primárnímu zesílení signálu, vhodnější nežli zesilovače, jejichž srdcem je polovodičový prvek [3]. Především pro signály z elektroakustických nástrojů a mikrofónů je elektronka ideálním řešením, které je již zažitě ve studiích po celém světě.

Obecně lze hovořit, že zesilovače osazené elektronkami mají příjemnější zvuk při libovolném stupni vybuzení, projevují se nenásilnou a neostrou (tzv. měkkou) limitací, celkový dojem je přirozenější a nemá tendenci unavovat, jak tomu někdy bývá speciálně u „rychlých“ zesilovačů s unipolárními tranzistory. Elektronky tak nabízí charakter zvuku, který je do jisté míry jedinečný a těžko proveditelný pomocí polovodičových prvků. U kytarových aparátů, které záměrně pracují v oblasti přebuzení, je tento „lampový charakter“ zvuku takřka nemožné věrně napodobit i s pomocí moderních softwarových

úprav a efektů.

1.2 Koncepce lampových zesilovačů

Lze namítat, že u těchto nástrojových zesilovačů osazených elektronkami se zvuk z části dotváří až v samotném koncovém stupni, který ne vždy musí být nutně osazen tímto vakuovým prvkem. Pokud však zajistíme, aby koncový stupeň nepracoval v limitaci, postačí k vytvoření onoho typického „lampového zvuku“ optimálně navržený předzesilovač, jehož srdcem je právě elektronka. Koncový stupeň již osazený pouze tranzistory pak jen reprodukuje bez limitace a vlastního přibarvení to, co již bylo ovlivněno pomocí lampy v předzesilovači [3].

Pro dosažení výše uvedených předpokladů, tedy aby se koncový stupeň zesilovače co nejméně podílel na celkovém zkreslení soustavy, je třeba zajistit pomocí některého nebo kombinací několika z následujících způsobů: [3]

- Koncový stupeň zesilovače je velmi kvalitní, se zanedbatelným zkreslením všech známých typů (především přechodové, transientní, intermodulační a fázové), dosahuje vysoké rychlosti přeběhu
- Obvody předzesilovače jsou napájeny tak, aby bylo zajištěno, že při přebuzení nastává omezení signálu (limitace) pouze (resp. nejdříve) v předzesilovači, nikoliv v dalších stupních zesilovače
- Koncový stupeň zesilovače je výkonově výrazně předimenzován a nebude tak nikdy pracovat na plný výkon
- Koncový zesilovač je doplněn limitérem s optimalizovanou charakteristikou omezení a časy reakce a doběhu, obvod limiteru disponuje nepatrným vlastním harmonickým zkreslením, zároveň nijak nezhoršuje zkreslení výkonového stupně

Tuto koncepci využívají i továrně vyráběné aparatury – elektronkové mikrofonní a nástrojové předzesilovače, ze kterých se signál přivádí do polovodičových koncových stupňů nebo do jiného zařízení typu mixážního pultu atp. Zanedbatelnou skupinu v tomto smyslu tvoří kytarová pololampová komba, která při tomto uspořádání stupňů vlastního zesilovače nabízí dostupnou avšak zvukově obdobnou alternativu tzv. celolampových aparátů, které v signálové cestě neobsahují žádný aktivní polovodičový prvek, díky tomu jsou však velmi finančně nákladné.

Z výše uvedených poznatků se pololampový koncový stupeň předzesilovače jeví jako nejvhodnější koncepce pro účel konstrukce předzesilovače pro spolupráci se snímacími zařízeními včetně mikrofونů.

1.3 Zkreslení elektroakustických zařízení

Jedním z klíčových parametrů elektroakustických zařízení je zkreslení. Obecně lze takto nazývat situaci, kdy se výstupní signál liší od vstupního a to způsobem, který je při poslechu zpravidla nepříjemný [4].

Zkreslení primárně rozlišujeme dvojího druhu:

- kmitočtové
- harmonické

Kmitočtové zkreslení si můžeme představit jako přenos různých kmitočtů s různou velikostí a fází. Takto se výsledný zvukový projev deformuje a navíc dochází ke změně prostorového vjemu posluchače [4].

1.3.1 Harmonické zkreslení

Harmonické zkreslení, též často označované jako nelineární či tvarové, způsobuje změnu tvaru signálu procházejícího zařízením. Takže i přesný sinusový signál dodaný generátorem do vstupu zařízení na jeho výstupu již přesně sinusový nebude. Tato změna sebou nese i fakt, že spolu se zkreslením tvaru původního signálu se ve spektru objeví další složky, tzv. harmonické. Název nelineární plyne z tvaru převodní charakteristiky, která není přímková, resp. závislost výstupu na vstupu není možné popsat lineární rovnicí [4].

Efektivní hodnota součtu všech harmonických k základní (první) harmonickém nazývá celkové harmonické zkreslení, neboli THD (Total Harmonic Distortion), udává se v procentech. THD je dnes nejpoužívanějším měřítkem nelineárního zkreslení a obecně jej můžeme definovat takto:

$$THD = \frac{\sqrt{u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \dots}}{u_1} \cdot 100[\%] \quad (1.1)$$

kde u_1 reprezentuje napětí první (základní) harmonické složky, u_2 napětí druhé harmonické složky, u_3 třetí, atd.

Jednotlivé velikosti a poměry jednotlivých harmonických složek mají

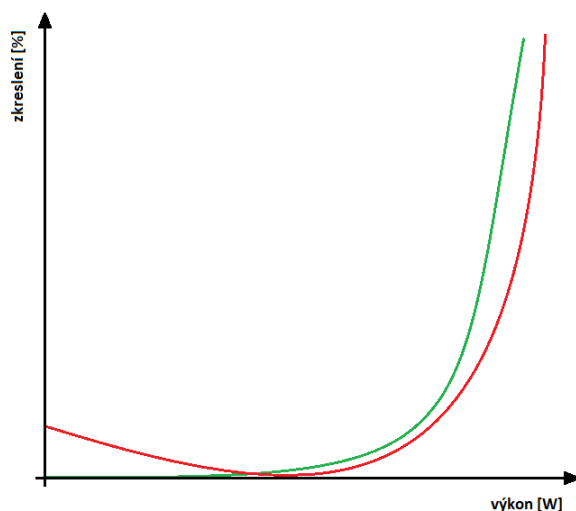
přímou souvislost s velikostí a zakřivením přechodové charakteristiky zesilovače. Ideální soustava bez zkreslení vykazuje přímkovou přenosovou charakteristiku, tzn. výstupní signál je identický se vstupním. Např. zkreslení druhou harmonickou odpovídá velmi mírnému prohnutí této závislosti. Čím vyšší řád harmonické budeme uvažovat, tím bude výsledná deformace zmíněné charakteristiky zesilovače výraznější [5].

Důležitým poznatkem však je, že každá harmonická nepřispívá k výslednému sluchovému vjemu stejně. Je prokázáno, že vyšší harmonické, především v okolí 6 kHz, výrazně přispívají k nepříjemnému sluchovému vjemu [5]. Lze tedy namítat, že samotná hodnota THD není zcela objektivním měřítkem slyšitelného zkreslení, mnohem větší vypovídací hodnotu ohledně zkreslení (potažmo kvality) zesilovače má tak spektrum harmonických, které však drtivá většina výrobců nezveřejňuje. Subjektivní akustický vjem a samotná schopnost vnímat zkreslení je však bezesporu u každého člověka odlišná, stejně jako vnímání hlasitosti, práh slyšení i maskovací schopnost, atd. [6], [7]

1.3.2 Zkreslení zesilovacích prvků

V případě předzesilovačů (taktéž mikrofónů) se nelineární zkreslení projevuje takřka neměřitelným způsobem, neboť pracují v běžných podmínkách s velmi slabým signálem [4].

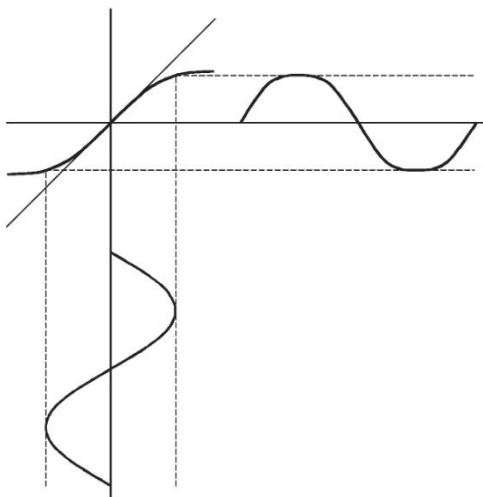
V případě výkonových zesilovačů je situace složitější. Tyto obvody mohou nabývat obecně charakteru jak měkkého, tak i tvrdého omezení výstupního signálu. V obvodech zesilovačů osazených bipolárními tranzistory se navíc objevuje i zkreslení přechodové, které ze své podstaty do značné míry ovlivňuje i závislost zkreslení na výkonu (viz Obr. 2) [4]. Toto zkreslení je posluchači obecně hodnoceno jako „drsný“ až „zrnitý“ charakter zvuku, který je pro přirozený poslech silně nepříjemný.



Obr. 2 Průběh zkreslení zesilovače

s přechodovým zkreslením (červeně) a bez tohoto zkreslení (zeleně) [4]

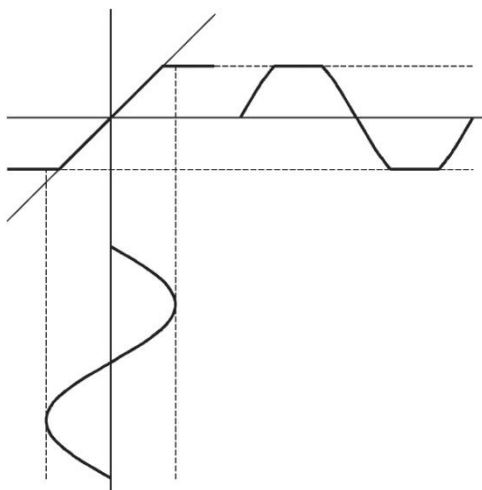
Průběh červené křivky, kdy se absolutní hodnota zkreslení směrem k nízkým výkonům zvětšuje, vykazují zesilovače s bipolárními tranzistory, typicky pracující ve třídě B. Zelená křivka odpovídá zesilovači bez přechodového zkreslení, kdy hodnota zkreslení na nízkých výkonech je prakticky nulová. Takovýto charakter zkreslení mají právě elektronkové zesilovače [4].



Obr. 3 Ukázka symetrického omezení – měkké [4]

Lampové zesilovače poskytují díky těmto pozitivním vlastnostem elektronek při malém až středním vybuzení zanedbatelné zkreslení. Během většího vybuzení elektronka přechází do měkké limitace, které lidský sluch přijímá jako méně

rušivé. Díky pozvolnému přechodu zesilovacího prvku do oblasti limitace se ve spektru výstupního signálu navíc projeví zkreslení převážně nízkými sudými harmonickými. V souladu s předchozími teoretickými předpoklady (viz kapitola 1.3.1) si můžeme tímto odůvodnit fakt, že elektronkové zesilovače jsou svým zvukovým projevem obvykle velmi příznivě hodnoceny, byť jejich absolutní hodnota zkreslení THD bude nabývat značně vyšší hodnoty, než je tomu u zesilovačů tranzistorových [4].



Obr. 4 Ukázka symetrické omezení – tvrdé [4]

V případě zesilovačů osazených bipolárními tranzistory jsou přenosové charakteristiky v oblasti přechodu do limitace velmi ostřeji zakřivené, než je tomu u elektronek, navíc vlastnosti tranzistoru jsou výrazně ovlivněny velikostí protékajícího proudu. Při vysokých výkonech je zde riziko přehřívání polovodičového přechodu tranzistoru (bez tepelné vazby) a s tím související rizika, v horším případě poškození či nenávratné zničení součástky. Proto při návrhu zohledňujeme tuto tepelnou závislost a snažíme se hospodárně využívat dodaný příkon a omezit tak vznikající tepelné ztráty. Při malém klidovém příkonu však opět vzroste přechodové zkreslení (Obr. 2). Kromě koncového stupně se navíc mohou uvnitř velmi složitých zapojení objevit i prvky, které pracují na hranici limitace a za určitých okolností mohou v kombinaci s buzením skutečným zvukovým signálem způsobit velmi nepříjemný zvukový projev, byť by přenosové vlastnosti zesilovače při plném vybuzení pouze harmonickým signálem byly špičkové. Technické parametry takového zesilovače tak nemusí zcela objektivně vypovídat o příjemnosti sluchového vjemu posluchače [4].

2 PROBLEMATIKA ELEKTRONEK

Následující kapitola se zabývá nezbytným teoretickým úvodem do problematiky užití elektronek v audiotechnice a shrnuje nejdůležitější poznatky a zásady pro konstrukci zařízení s těmito vakuovými prvky.

2.1 Princip elektronky

Elektronka je aktivní elektronická součástka, která pracuje na principu řízení toku elektronů vytvořeného tepelnou emisí ve vakuu vyčerpané baňky. Do vyčerpané (s případnou příměsí netečných plynů nebo rtuti) skleněné či kovové baňky jsou umístěny nejméně dvě elektrody – anoda a katoda. Jedna z elektrod – katoda je rozžhavena na vysokou teplotu, díky které může dojít k úniku volných elektronů, tento jev je také znám jako termoemise. Elektrony, které unikají (emitují) ze žhavé katody jsou přitahovány druhou elektrodou – anodou. Pro žhavení katody se používá relativně nízkého napětí, a to jak střídavého, tak stejnosměrného např. i z akumulátoru. Stejnosměrné žhavení má výhodu v tom, že lze u předzesilovačů dosáhnout lepšího odstupu signálu od brumu. V případě střídavého žhavení se někdy musí brum potlačovat dalšími kompenzačními obvody.

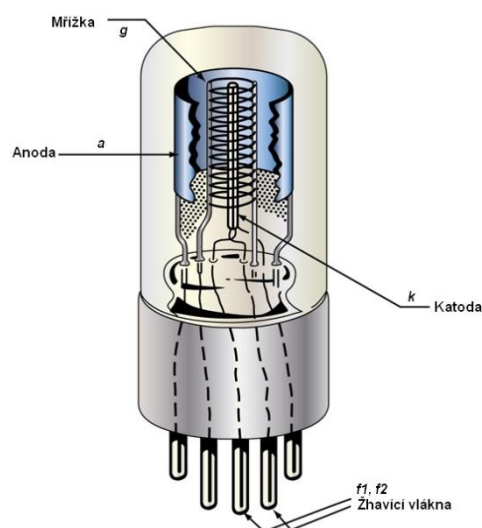
Dále je možné dělit elektronky dle způsobu žhavení – na přímo žhavené a nepřímo žhavené. Všechny elektronky, které se dnes používají v nf technice (vyjma některých usměrňovacích), jsou zpravidla nepřímo žhaveného typu.

Dle funkce a druhu může mít elektronka více elektrod, tzv. mřížek. Nízkou úrovní napětí přivedeného na řídicí mřížku řídíme výstupní napětí na výstupu (anodě). Všechny elektrody jsou zataveny do baňky a vyvedeny přes kontaktní kolíky, popř. u starších druhů mohou být vývody připájeny přímo k patici [7].

V praxi jsou elektronky relativně odolnou součástkou, a to jak z elektrického hlediska (značná přetížitelnost), tak i z mechanického hlediska (odolnost proti otřesům) [7].

Podle počtu elektrod (mřížek) rozeznáváme různé druhy elektronek. Nejjednodušší je dioda se dvěma elektrodami, anodou a katodou. Následuje trioda, tetroda, pentoda a vícemřížkové elektronky. Anoda se značí písmenem *a* (anode), katodový vývod *k* (katode) a konečně vývod mřížky písmenem *g* (grid), žhavicí vlákna se běžně označují písmeny *f* (filament) [8].

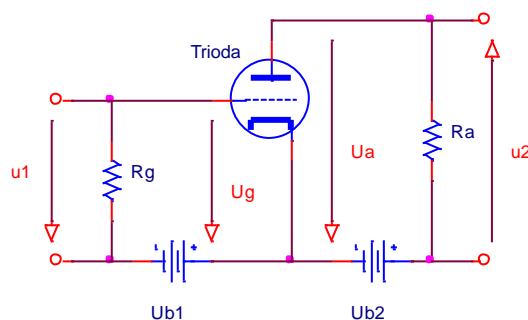
Zjednodušený náčrt konstrukce elektronky – triody je patrný z Obr. 5:



Obr. 5 Elektronka (trioda); principiální náčrt konstrukce [9]

2.2 Elektrické vlastnosti elektronky

Pro popis základních vlastností elektronky budeme uvažovat nejčastěji používanou elektronku v audiotechnice – triodu. Na Obr. 6 vidíme zapojení triody v elektrickém obvodu. Pracovní bod triody je určen anodovým proudem I_a , anodovým napětím U_a a napětím na mřížce U_g . Vzhledem k tomu, že mřížka musí být vždy proti katodě záporně orientovaná (jinak by vlastně převzala částečně funkci anody a tekla by jí mřížkový proud, místo anodového), je nutné v obvodu vytvořit potřebné záporné předpětí, aby elektronka pracovala v lineární oblasti svojí charakteristiky [8].



Obr. 6 Základní zapojení triody se společnou katodou

Pokud do jinak diodového systému vložíme mezi katodu a anodu mřížku, můžeme napětím na této mřížce měnit proud protékající mezi katodou

a anodou. Zvyšováním záporného napětí vůči katodě se anodový proud snižuje, kladným napětím se naopak proud elektronkou zvětšuje. Řízení přenosu elektronky je tedy velmi obdobné jako u ovládání pracovního bodu v případě tranzistoru [3].

Jak bylo již řečeno, proud elektronkou je ovlivněn napětím na mřížce. Ovšem s tím, že řízení nevyžaduje téměř žádný proud, neboť elektronka má velký vstupní odpor a je tak řízena jen napětím podobně jako tranzistory typu FET (Field Effect Transistor) [8].

Toto však platí jen při stejnosměrném pracovním režimu elektronky, při provozu elektronky v nf (a zejména vf) oblasti se uplatňují nezanedbatelné kapacity mřížky vůči ostatním elektrodám [3].

Spolu se zvyšováním vstupního napětí u_1 na mřížkovém odporu R_g se taktéž zvětšuje anodový proud I_a , snižuje se anodové napětí U_a a zvyšuje se výstupní napětí u_2 na odporu R_a [8].

V obvodu zesilovače je mezi anodu elektronky a zdroj anodového napětí zařazen pracovní (anodový) odpor. Změnu úbytku napětí na tomto pracovním odporu lze vyvolat změnou napětí mřížky. Pro nastavení pracovního bodu elektronky se do série s katodou zapojuje další odpor, na kterém protékající katodový proud (v případě triody ideálně stejný jako anodový) vytvoří potřebný úbytek napětí. Mřížka se pak přes vysokou hodnotu odporu (řádově stovky k Ω až jednotky M Ω) připojí na zápornější konec tohoto katodového odporu, nejlépe tak přímo na zem [3].

V případě koncového výkonového zesilovače osazeného elektronkou by byl takový rezistor v katodě velmi výkonově zatěžován, proto se většinou záporné předpětí získává ve zvláštním zdroji záporného napětí [3].

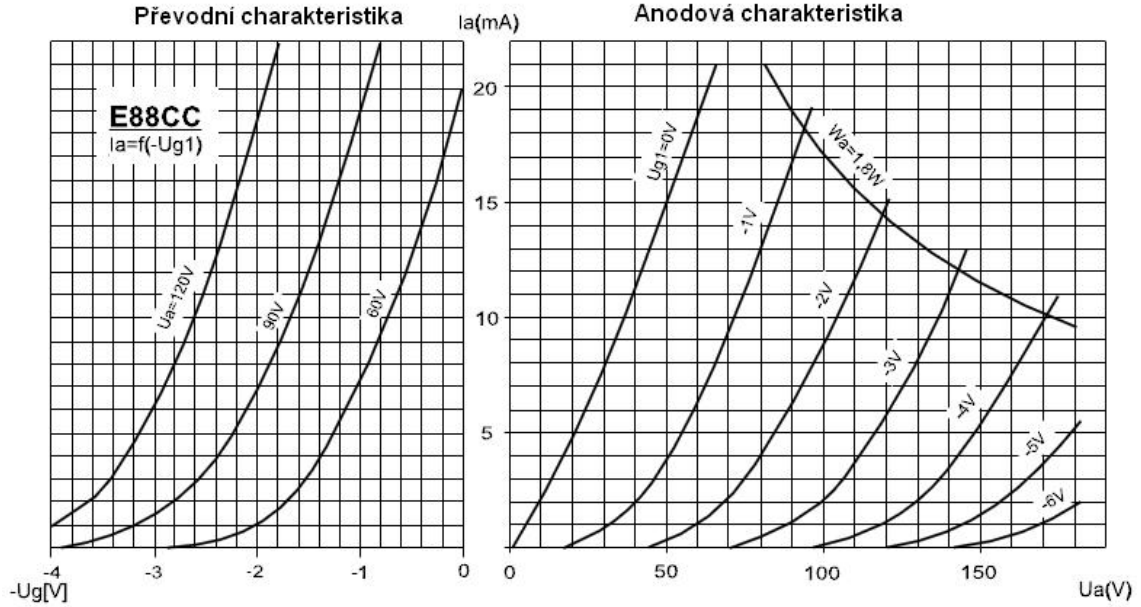
Kromě záporného předpětí se na mřížku přivádí i malé střídavé napětí (užitečný vstupní signál), které vyvolává změny anodového proudu a ty pak vyvolají vysoké střídavé změny na anodovém odporu. V konfiguraci se společnou katodou tedy elektronka napěťově i proudově zesiluje.

Napěťové zesílení elektronky A_u je dáno vztahem:

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} [-] \quad (2.1)$$

Pokud chceme ovládat anodový proud bez přidaného zkreslení, musí být předpětí řídicí mřížky stanoveno přibližně ve středu mřížkové (převodní)

charakteristiky (angl. transfer characteristic). Jak vidíme z Obr. 7, tato charakteristika (vyobrazen příklad pro vakuovou triodu ECC88) vyjadřuje závislost průběhu anodového proudu I_a na mřížkovém napětí U_g [12].



Obr. 7 Modelová charakteristika triody - ECC88 [12]

V pravé části Obr. 7 je vyobrazena parametrická závislost anodového proudu I_a na anodové napětí U_a pro různá mřížková napětí U_g , tuto závislost nazýváme anodovou charakteristikou elektronky (angl. plate characteristic) [8].

Pro definici pracovních podmínek elektronek v zesilovači jsou důležité jejich statické i dynamické parametry:

Strmost (angl. slope, mutual conductance, transconductance) je definována jako poměr změny anodového proudu ΔI_a ke změně napětí na mřížce ΔU_g , obvykle se udává v [mA/V]:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}, \text{ při } U_a = \text{konst.} \quad (2.2)$$

Následujícím parametrem elektronky je průnik D (angl. penetrance), který je definován následovně:

$$D = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} \cdot 100[\%] \quad (2.3)$$

Průnik je definován při konstantním anodovém proudu. Je to vlastně převrácená hodnota známějšího napěťového zesilovacího činitele elektronky (angl. amplification factor), který můžeme popsat takto:

$$\mu = \frac{1}{D} \quad (2.4)$$

Napěťový zesilovací činitel u triod je obecně poměrně malý, např. u ECC82 je $\mu = 17$, u ECC83 je μ kolem hodnoty 100 [10], [11].

Pro návrh přizpůsobovacích obvodů předzesilovače, výstupních transformátorů a koncových stupňů se též může hodit hodnota vnitřního odporu elektronky. Ten je vyjádřen vztahem:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}, \text{ při } U_g = \text{konst.} \quad (2.5)$$

Vnitřní odpor je tedy poměr přírůstku anodového proudu k přírůstku anodového napětí při konstantním mřížkovém napětí a udává se obvykle v [kΩ].

U elektronky ECC82 je vnitřní odpor roven 7,7 kΩ, v případě ECC83 pak 62,5 kΩ. Tyto parametry se zdají být pro použití elektronek v předzesilovači pro hudební aplikace naprosto vyhovující [10], [11].

Mezi diferenciálními parametry elektronky v daném pracovním bodě platí tzv. Barkhausenův vztah, který obecně je definován takto:

$$S \cdot R_i \cdot D = 1 \quad (2.6)$$

Jak bylo již zmíněno, pracovní bod elektronky P je jednoznačně určen trojicí odpovídajících hodnot anodového napětí, anodového proudu a mřížkovým napětím, tedy U_a , I_a a U_g . Pro tento pracovní bod definujeme anodový odpor v pracovním bodě vztahem:

$$R_p = \frac{U_a}{I_a}, \text{ pro } U_g = \text{konst.} \quad (2.7)$$

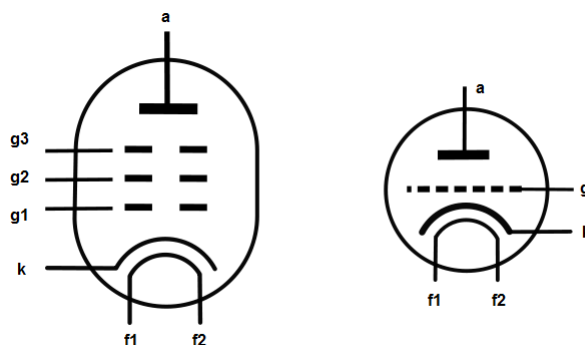
2.3 Nevýhody elektronek

Pro použití elektronek v hudební technice je však do značné míry limitující kapacita mezi anodou a mřížkou elektrony. Např. u vakuové triody ECC83 omezuje parazitní kapacita horní kmitočtový rozsah u zdrojů signálu s vysokým vnitřním odporem (kytarové cívkové snímače, některé typy mikrofónů, korekční stupně, atd.) a ve většině případů je nutné ji v zapojení kompenzovat, což výrobci zesilovačů respektují [3].

Pro odstranění nevýhod triod se používají elektrony s dalšími mřížkami – tzv. pentody. Tyto elektrony mají mezi první (řídící) mřížkou a anodou ještě další dvě mřížky. Druhá mřížka (směrem od katody) g_2 snižuje kapacitu mezi řídící mřížkou a anodou [3].

Pentoda má oproti triodě větší zesílení, lepší linearitu a podstatně nižší kapacitu mezi řídící mřížkou g_1 a anodou. Takové elektrony jsou tedy parametricky výhodné pro všechny aplikace. Pentody vítězí nad triodami i ve velikosti napěťového zesílení [3].

Bohužel však, na rozdíl od triody, která zkresluje druhou harmonickou, vyvábí pentoda zkreslení třetí harmonickou, což je pro audio aplikace ne zcela ideální (liché harmonické působí pro sluch rušivěji, viz kapitola 1.3). Díky tomuto se tyto elektrony do nástrojových zesilovačů a předzesilovačů příliš nepoužívají. Při přebuzení nelze s pentodou dosáhnout žádaného zvuku a záměrně „kulatého“ zkreslení u kytarových zesilovačů. Naopak je zvuk zkreslen nepříjemně znějícími lichými harmonickými, podobně jako tomu bývá u tranzistorových zesilovačů [3].



Obr. 8 Schematická značka elektrony

- pentody (nalevo) a triody (napravo)

V hudebních zesilovačích na pozici prvního stupně se zásadně užívají triody,

nejčastěji již zmíněná ECC83. Jejich americká podoba se značí jako 12AX7. V některých zapojeních se přesto setkáme s elektronkou ECC82, která je díky svým vlastnostem [11] spíše předurčena pro buzení dalších stupňů zesilovače s menším vstupním odporem. Jiné typy vakuových triod se na těchto pozicích příliš neobjevují a výrobci hudebních zařízení zřejmě sází na osvědčenou koncepci a „jistotu“ ve zvukovém projevu [3].

Elektronky ECC83 a ECC82 jsou si velmi podobné nejen vzhledově, ale i zapojením vývodů. Triody ECC83 jsou charakteristické svým velkým vnitřním odporem a velkým napěťovým zesílením, ECC82 je oproti ní schopná pracovat i do relativně malého zatěžovacího odporu, do kterého tak umožňuje dodat vysoký výkon. Tento fakt se dá využít např. u buzení dalších bipolárních tranzistorových stupňů [3], [10], [11].

Další známým typem elektronky je ECC88, který se často používá pro možný anodový proud 15 mA, ale především pro malé pracovní napětí i pod 90 V (viz [12]). Především z posledního jmenovaného důvodu jsou tyto lampy vhodné jako předzesilovače. Tyto vlastnosti jsou však vykoupeny potřebou vysoké zatěžovací impedance – řádově od 100 k Ω a výše. Možnou alternativou, jak toto omezení obejít, je použití koncového stupně v podobě polovodičového „bufferu“, který se vyznačuje vysokou vstupní impedancí a značnou zatížitelností výstupu (BUF634 apod.), popřípadě běžnými typy operačních zesilovačů v případě, kdy vysoký výstupní proud nepožadujeme [12].

Existují i speciální typy pentod vhodných do nf předzesilovačů, např. typ EF86, EF806S, atd. [3]. Tyto pentody disponují celou řadou výhodných vlastností, nicméně jejich charakteristiky jsou tvarově velmi podobné s charakteristikami tranzistorů. I to je možná důvod, proč se v hudebních zesilovačích opět příliš neprosadily.

2.4 Značení a druhy elektronek

Pro orientaci je vhodné ve stručnosti uvést základní principy značení, potažmo druhy těchto vakuových prvků. Následující značení je však odlišné od amerického systému značení elektronek.

První písmeno udává žhavicí napětí. V případě např. televizních elektronek (sériové žhavení) se udává žhavicí proud [3]:

- A – žhavicí napětí 4 V
- D – žhavicí napětí 1,2 V popř. 1,4 V

- E – žhavicí napětí 6,3 V
- G – žhavicí napětí 5 V
- P – žhavicí proud 300 mA
- U – žhavicí proud 100 mA
- V – žhavicí proud 50 mA

Dalším znakem je písmeno nebo skupina písmen, které udávají typ užitého systému [3]:

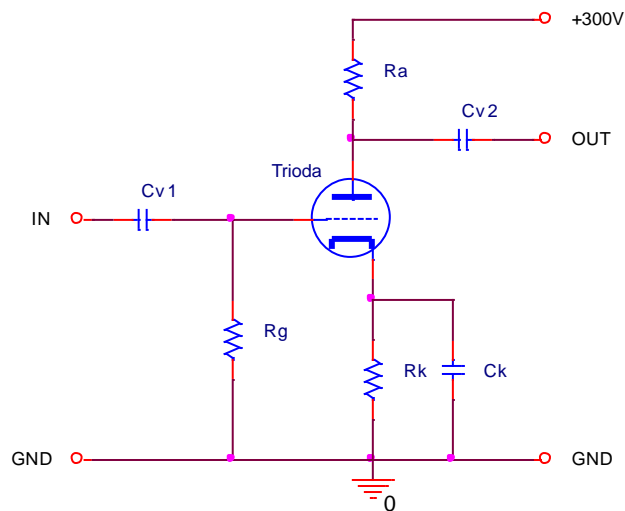
- A – dioda
- B – dvojitá dioda
- C – trioda (nízký výkon)
- D – trioda (koncová – vysoký výkon)
- E – tetroda
- F – pentoda (malý výkon)
- H – hexoda, heptoda
- K – oktoda, pentagrid
- L – pentoda (koncová – vysoký výkon)
- M – světelný indikátor (tzv. „magické oko“)
- B – eneoda
- W – jednocestný usměrňovač (plynový)
- X – dvoucestný usměrňovač (plynový)
- Y – jednocestný usměrňovač (vakuový)
- Z – dvoucestný usměrňovač (vakuový)

Třetí část označení je daná typem použité patice a vývojovým typem [3]:

- 1 až 10 – různé patice
- 11 až 15 – patice T
- 16 až 19 – patice P, oktal
- 20 až 29 – patice loktal (kromě D21, DF22)
- 30 až 39 – patice oktal
- 80 až 89 – patice noval
- 90 až 99 – patice heptal
- 180 až 189 – patice noval
- 200 – patice dekal
- 500 – patice magnoval
- 800 – patice noval

2.5 Základní zapojení zesilovacího stupně

V této kapitole bude osvětleno zapojení zesilovacího stupně s elektronkou – triodou (např. u předzesilovače). Na Obr. 9 vidíme typické zapojení triody se společnou katodou. Na tomto jednoduchém modelu si popíšeme význam jednotlivých součástí a bude tak snadné pochopit funkci elektronkového zesilovače, která se v zapojeních, s většími či menšími odchylkami, permanentně opakuje.



Obr. 9 Základní zapojení elektronkového zesilovacího stupně - osazeného triodou, zapojení se společnou katodou

Rezistor R_a na Obr. 9 je anodový (zatěžovací) odpor, na kterém změny anodového proudu vyvolají změnu napětí. Obvykle se volí hodnota 100 k Ω (pro ECC83) nebo vyšší [3].

Rezistor R_g je mřížkový odpor, přes který je na mřížku přiveden nulový potenciál země (resp. společný vodič napájení). Běžná hodnota je kolem 1 M Ω , ale výjimkou nejsou i řádově nižší hodnoty [3].

Katodový rezistor R_k vytváří úbytek napětí při průchodu proudu z katody, díky němu má katoda kladnější potenciál než mřížka. Obvyklá hodnota odporu tohoto rezistoru se volí na 1 až 3 k Ω [3].

$$R_k = \frac{U_g}{I_a} \quad (2.8)$$

Kondenzátory C_{v1} a C_{v2} jsou tzv. vazební kondenzátory, slouží pro oddělení

stejnoseměrné složky od té užitečné, tj. střídavé. Kondenzátory samozřejmě zároveň vytváří filtr typu horní propust, dělicí kmitočet je dán právě kapacitou těchto kondenzátorů. Obvyklá hodnota kapacity těchto prvků je od 10 nF po 68 nF, samozřejmě jejich maximální provozní napětí musí být vyšší než plné anodové napájecí napětí. Důležitá je i co nejnižší hodnota jejich svodového proudu [3].

Kondenzátor C_k je blokovací kondenzátor v obvodu katody elektronky. Jeho účelem je blokovat katodový rezistor pro střídavou složku napětí z důvodu potlačení záporné zpětné vazby, která tímto odporem vzniká. Jeho hodnota kapacity může být různá v závislosti na požadovaném tvaru frekvenční charakteristiky. Obvyklá hodnota jeho kapacity je asi 50 až 100 μF [3].

3 NAPÁJENÍ A ŽHAVENÍ ELEKTRONEK

Napájení zesilovačů osazených elektronkami tvoří samostatnou a rozsáhlou problematiku, která mimo jiné popisuje návrhové postupy při realizaci vstupních i výstupních transformátorů, stabilizační obvody, žhavicí obvody, filtrační RC členy a mnoho dalších kompenzačních prvků.

Vzhledem k tomu, že cílem této práce není ozřejmit problematiku návrhu napájecích zdrojů (a zároveň z důvodu rozsáhlosti této tematiky), budou v této kapitole nastíněny pouze základní zásady a požadavky pro návrh zdrojové jednotky pro předzesilovač osazený elektronkou.

3.1 Napájecí napětí elektronek

Napájení obvodů osazených elektronkou, která dosahuje vysokého vnitřního odporu (např. ECC83), se stanoví hodnota anodového napětí na optimálních 250 V až 300 V. Proudový odběr jedné triody ECC83 je relativně nízký – asi 2 mA. Napájecí napětí musí být dobře filtrované, neboť u značně zvlněného napájecího napětí hrozí pronikání do zpracovávaného signálu procházejícího elektronkou [3].

Pro tento účel je možné použít filtrační členy RC obsahující robustní kapacitní členy. Ty musí být samozřejmě dimenzované na maximální anodové napětí elektrony, naopak odporové členy nemusí (díky nízkému odběru triody) být příliš výkonově dimenzovány.

Napájecí anodové napětí se nejčastěji získává ze síťového transformátoru, který zpravidla disponuje více vinutími pro další obvody zesilovače (žhavení, napájení polovodičové části, fantomové napájení mikrofونů, atp.). Síťový transformátor tedy často disponuje např. následující konfigurací:

- Primární vinutí: $U_p = 230 \text{ V}; 50 \text{ Hz}$
- Sekundární vinutí č. 1: $U_{s1} = 2 \times 300 \text{ V}$ (anodové napětí)
- Sekundární vinutí č. 2: $U_{s2} = 2 \times 6,3 \text{ V}$ (žhavení)
- Sekundární vinutí č. 3: $U_{s2} = 5 \text{ V}$ (napájení polovodičů)

S oblibou se pro vytvoření anodového napájecího napětí využívají „obráceně“ zapojené transformátory. Tedy sekundární vinutí použít jako síťové a z vinutí, původně určeného pro síťové napětí 230 V, vyvést napětí k usměrnění pro anody elektronek. Tento postup je však třeba důkladně

prostudovat a ověřit, neboť v horším případě hrozí i průraz vinutí transformátoru.

Pro usměrnění se používá klasická čtveřice diod (či můstek) a pro vyhlazení napětí již zmíněné členy RC. Opět pro všechny tyto prvky zesilovače platí, že musí být dimenzovány na vysoké napájecí napětí mnohdy i přes 400 V. Oživování, měření a případné „doladění“ těchto obvodů tedy musí být prováděno s odpovídající opatrností.

V některých případech, typicky u mikrofonních předzesilovačů, se však záměrně využívá relativně nízkého anodového napájecího napětí. Tímto se dosáhne pracovního bodu elektronky, ve kterém dochází k měkké limitaci nf signálu již od jeho nízké úrovně. To se obzvláště hodí pro „dokreslení“ slabých akustických tlaků při snímání např. kondenzátorových mikrofonom. Stejně tak je možné tuto myšlenku využít při konstrukci malých, resp. přenosných audio zařízení, kdy není žádoucí opatřit i relativně jednoduchý lampový předzesilovač rozměrným a nákladným vstupním, resp. výstupním transformátorem.

3.2 Žhavení elektronek

Jak již bylo naznačeno, jmenovité žhavicí napětí, resp. žhavicí proud, je definováno pro každou elektronku a je nutné jej dodržet v toleranci $\pm 5\%$ [7].

V případě příliš nízkého žhavení elektronek (tzv. podžhavení) může být patrný pokles emise elektronů z katody, tento jev se také označuje jako „otrava katody“. Při krátkodobém podžhavení lze katodu opět obnovit mírným přezhavením. Při trvalém podžhavení hrozí trvalé poškození emisní vrstvy [7].

Při přílišném žhavení vlákna naopak dochází k přetěžování emisní schopnosti katody, což výrazně zkracuje životnost elektrody. Při správných podmínkách pro žhavení katody může elektronka dosáhnout životnosti až 5000 hodin, mnohdy i déle [7].

Pro získání žhavicího napětí se může kromě zvláštního vinutí využít i sestupným měničem. Nejčastěji se pro dosažení přesného žhavicího napětí (např. 12,6 V) využívá integrovaný stabilizátor (např. řady 78xx) s optimální výkonovou zatížitelností. Pro elektronku řady ECC je typický odběr jednoho žhavicího vlákna 150 mA, vlákna je výhodné spojit do série – vystačíme si s běžným stabilizátorem pro odběry do 1 A (např. 7812). Žhavicí napětí z výstupu stabilizátoru bude sice nabývat hodnoty o 5 % nižší, než potřebné jmenovité napětí 12,6 V, to je však dle výrobce stále vyhovující hodnota [10].

4 NÁVRH ZDROJOVÉ NAPÁJECÍ JEDNOTKY

Pro napájení všech elektronických obvodů mikrofonního lampového zesilovače je třeba navrhnout víceprvkovou zdrojovou část, neboť pro všechny části předzesilovače je zapotřebí následujících napájecích napětí:

- Optimální anodové napájecí napětí pro zvolenou dvojitou triodu ECC88
- Žhavicí napětí pro ECC88 (6,3 V)
- Fantomové napájecí napětí 48 V pro kondenzátorové mikrofony
- Optimální napájecí napětí pro polovodičové prvky (především OZ) – ideálně ± 15 V

Vzhledem k tomu, že navrhovaný předzesilovač je určen spíše pro „domácí“ stolní použití, je tedy cílem, aby jeho konstrukce odpovídala dnešním trendům v oblasti komerčně vyráběných přístrojů. Zařízení by tedy mělo být přenosné, uživatelsky přívětivé pro ovládání všech funkcí, s intuitivní obsluhou, nízkou hmotností a přijatelnými rozměry.

Převážně z tohoto důvodu se nabízí varianta napájení, kdy jsou anody elektronek záměrně napájeny relativně nízkým napájecím napětím (viz kapitola 3.1). Celá koncepce zesilovače se tak obejde bez vysokonapěťových transformátorů, vysokých hodnot napětí na filtračních kapacitách a celkově se obvodové zapojení výrazně zjednoduší.

Tato koncepce sebou nese ještě jednu výhodu, která je jedním z hlavních požadavků na realizovaný mikrofonní předzesilovač, a tou je dostupnost měkké limitace užitečného nf signálu již pro nižší úroveň signálu.

Výše popsané důvody stojí za klíčovým výběrem typu elektronky, za kterou byla zvolena ECC88. Napájecí jednotky – zdroj žhavení a anodového předpětí – byly přizpůsobeny právě pro tento typ vakuové triody.

Nízké napájecí napětí sebou nese i vyšší spolehlivost zařízení, nižší konstrukční náklady a snazší opravitelnost. I to jsou zřejmě důvody, proč k této koncepci napájení elektronek přistupují např. i výrobci kytarových efektových pedálů, kde je navíc i požadavek na malé rozměry a nízkou hmotnost.

Další možností jak snížit složitost zdrojové jednotky je důmyslné využití vinutí a počtu transformátorů. V ideálním případě by pro vytvoření všech potřebných napětí bylo možné použít pouze jeden transformátor s příslušným

počtem vinutí. Vzhledem k tomu, že napájecí napětí v obvodu předzesilovače nejsou zcela běžná, vyžadují odlišnou zatížitelnost a potřebný transformátor by byl těžko k dostání (nebo by jej bylo třeba zakázkově vyrobit), bude pro vytvoření napájecích napětí optimálně využito principů stabilizace spolu se zdvojovači napětí.

4.1 Návrh obvodu stabilizovaného zdroje žhavení

Pro žhavení dvojitych triod řady ECC je používaná hodnota žhavicího napětí 12,6 V DC při žhavicím proudu 150 mA, kdy jsou obě vlákna spojena do série V případě potřeby je možné vlákna zapojit paralelně při napájení 6,3 V/300 mA na každé vlákno. V tomto případě je však výhodnější sériové řazení vláken. Výjimku tvoří námi zvolená trioda ECC88 umožňující pouze sériové řazení žhavicích vláken (pin č. 9 neobsazen), a to při žhavicím napájení 6,3 V/365 mA.

Vzhledem k proudové zátěži v kombinaci s relativně nízkým napětím je výhodné pro obvod žhavení vyhradit samostatný transformátor s požadovaným výkonem. Pro nastavení stabilního napětí pro žhavení je nejvýhodnější využít funkci integrovaného regulátoru napětí (např. řady LM78xx, LM317, atp.), který musí být dostatečně proudově dimenzován (výstupní proud 1 A) a chlazen. Stabilní zdroj tohoto napětí lze snadno využít i napájení přídavných a indikačních obvodů. V našem případě jsou to obvody buzení obou relé, napájení podsvětlení hlavního spínače, v případě potřeby lze napětí 6,3 V využít i pro zapojení malého ventilátoru pro lepší odvod tepla ze skříně.

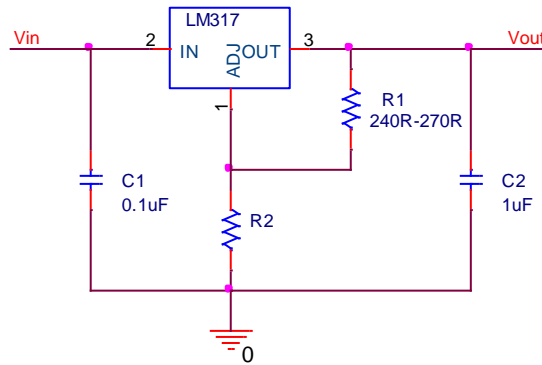
Pro transformaci a usměrnění síťového napětí je použit EI transformátor s výstupním sekundárním napětím 9 V AC v kombinaci s klasickým můstkovým usměrňovačem, ve schématu označeným *M1*. Typ transformátoru byl zvolen s ohledem na min. požadovaný výstupní proud cca 400 mA, požadované stabilizované výstupní napětí 6,3 V a omezené rozměry přístrojové skříně (především její výška). Taktéž použití transformátoru s nižším výstupním napětím nelze doporučit – při započtení maximálních úbytků napětí na usměrňovacím můstku U_{ZM1} , zvoleném napěťovém regulátoru U_{ZVR1} a možného zvlnění výstupního napětí U_{ZVL} je potřebná efektivní hodnota střídavého napětí na sekundárním vinutí transformátoru:

$$U_{AC_{MIN}} = (U_{OUT} + U_{ZM1} + U_{ZVR1} + U_{ZVL}) / \sqrt{2} \quad (4.1)$$

$$U_{AC_{MIN}} = (6,3 + (2 \cdot 0,9) + 2 + 0,5) / \sqrt{2} = \underline{\underline{7,5 \text{ V}}}$$

Zjednodušeným výpočtem získanou hodnotu potřebného AC napětí sekundárního vinutí je vhodné mírně naddimenzovat, proto byl vybrán transformátor s převodem prim. 230 V AC/ sek. 1x9 V AC.

Pro návrh zvoleného stabilizovaného zdroje pro žhavení je použito velmi známého zapojení s osvědčeným nastavitelným lineárním regulátorem napětí LM317, kterým bude možné dostavit výstupní napětí na přesnou hodnotu. Typické (katalogové) zapojení zmíněného obvodu vyobrazeno na Obr. 10.



Obr. 10 Typické zapojení integrovaného regulátoru napětí LM317

Obvod se snaží na výstupu nastavit takové napětí, aby difference mezi piny 1 a 3 byla 1,25 V (V_{REF}). Připojíme-li tedy mezi vývod 1 a zem rezistor (R_2), jeho velikostí odporu můžeme nastavit přesně výstupní napětí. Pro hodnoty snímacího odporu R_1 výrobce doporučuje použít rozsah (240 – 270) Ω . V takovém případě teče z pinu 1 proud I_{ADJ} o velikosti asi 50 μA . Výstupní napětí lze tedy lehce vypočítat z následujícího vztahu:

$$V_{OUT} = V_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} \cdot R_2 \quad (4.2)$$

Pro zvolené napětí V_{OUT} v rozsahu 1,2 až 37 V lze při zanedbání proudu z pinu 1 získat vztah pro výpočet potřebného odporu R_2 :

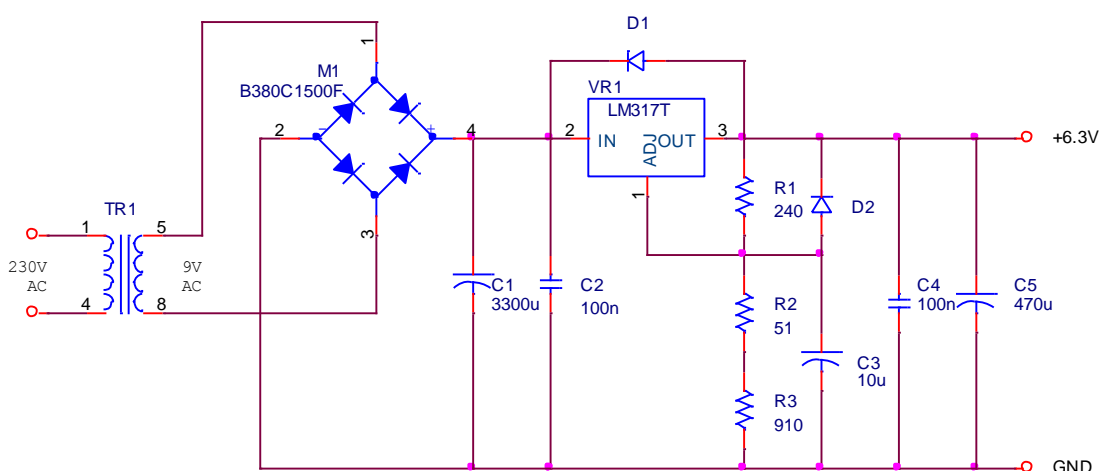
$$R_2 = R_1 \cdot \left(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1\right) \quad (4.3)$$

$$R_2 = 240 \cdot \left(\frac{6,3}{1,25} - 1\right) = \underline{\underline{969,6 \Omega}} \rightarrow \text{volíme } 910R + 51R \text{ (řada E24)}$$

Pro přesné dostavení hodnoty žhavicího napětí 6,3 V použijeme tedy sériovou kombinaci dvou odporů (ve schématu označeny $R2$ a $R3$).

Do typického zapojení regulátoru napětí byl doplněn kondenzátor $C3$, který spolu s diodami $D1$ a $D2$ zlepšují chování a vlastnosti stabilizátoru (viz Obr. 11).

Kondenzátor $C2$ a $C4$ zlepšuje stabilitu a odezvu na skokovou změnu zátěže, kapcitor $C3$ zlepšuje potlačení zvlnění na výstupu až o 15 dB (asi 5x). Dioda $D2$ zajistí vybití $C2$ při zkratu na výstupu a vypnutí zdroje. Dioda $D1$ chrání zdroj před zničením zpětným proudem do výstupu [13].



Obr. 11 Schéma zapojení obvodu regulátoru pro žhavení elektronky

V případě použití jiného typu elektronky z řady ECC je možné se změnou typu transformátoru (sek. 1x12 V) a odporů $R2$ a $R3$ docílit požadovaného žhavicího napětí 12,6 V ($R2 = 2k\Omega$, $R3 = 180\Omega$), je však třeba počítat i s vyšším napěťovým dimenzováním hlavního filtračního kondenzátoru $C1$ (25V) a cívek obou relé $RE1$, $RE2$ (24V). Ostatní obvody mohou být při této úpravě ponechány beze změn.

Kromě samotného obvodu regulátoru napětí jsou součástí obvodu stabilizovaného zdroje i přidané obvody zajišťující spínání výstupu žhavení spolu se spínáním síťového napětí pro druhý stabilizovaný zdroj sloužící pro napájení signálové (polovodičové) části celého zesilovače. Stiskem panelového podsvětleného tlačítkového spínače $SW1$ přivedeného na konektor $X5$ docílíme sepnutí obou relé, čímž zesilovač uvedeme do plného provozu. Relé $RE1$ sepne žhavení elektronky na svorkovnici $X3$, druhé relé $RE2$ spíná kontakt fázové svorky na konektoru $X1-2$. Při dalším stisku tlačítka $SW1$ obě relé odpadnou, zesilovač se tak uvede do pohotovostního režimu. Podsvícení tlačítkového

spínače *SW1* indikující provozní režim je, rovněž jako žhavení elektronky, vyvedeno z výstupní svorkovnice *X3*.

Cívky obou relé *RE1* a *RE2* jsou pro účel snížení ztrát napájeny z vyhlazeného nestabilizovaného napětí, které je dostupné před regulátorem *VR1*.

Zásluhou obvodů *IC1* a *IC2* můžeme kromě samotného buzení zesilovače využít i logický signál přivedený na konektor *X4*, který může sloužit např. pro řízení provozu dalších zařízení v signálovém řetězci.

Zásluhou této koncepce zdroje žhavení je síťové napětí při pohotovostním režimu zesilovače přivedeno pouze na vstupní svorky *X1-1* a *X2-1* a uvnitř zdroje žhavení jsou ze ss stabilizovaného napětí 6,3 V napájeny pouze nezbytné obvody pro spínání celého zesilovače. Tím je při pohotovostním režimu zajištěn pouze nepatrný odběr ze sítě. Zároveň je tak v pohotovostním režimu umožněno pohodlné zapojování vstupních i výstupních zvukových zařízení bez přítomnosti nepříjemných rázů a lupnutí, a to díky tomu, že celá signálová část předzesilovače, jakožto i druhý stabilizovaný zdroj, jsou bez napájecího napětí.

4.2 Návrh obvodu stabilizovaného napájecího zdroje

Pro napájení integrovaných obvodů signálové části je třeba symetrické stabilizované napětí nejlépe ± 15 V. Pro vytvoření stabilního zdroje tohoto napětí bylo využito zapojení sériového regulátoru s operačním zesilovačem a Darlingtonovým zapojením tranzistorů. Oproti jednoduššímu zapojení zdroje s monolitickým regulátorem napětí, jako je tomu u zdroje žhavení, nabízí tato varianta zdroje lepší potlačení síťových a vf rušivých složek, rychlejší odezvu a menší šum obsažený ve výstupním napětí.

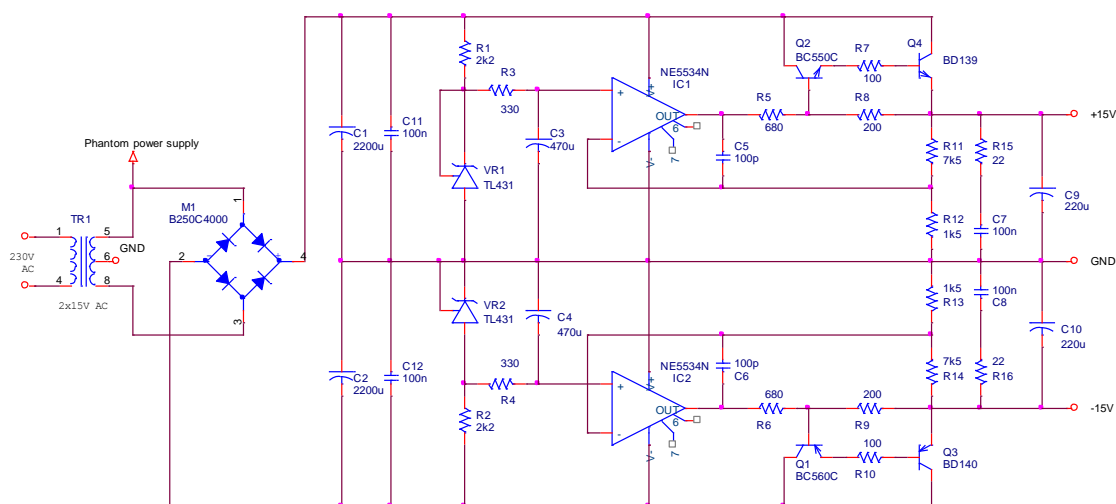
Pro usměrnění bude opět použit klasický diodový usměrňovací můstek *M1*. Použitý nízkoprofilový toroidní transformátor *TR1* disponuje dvěma primárními vinutími 2x115 V AC zapojených do série, i dvěma sekundární vinutí 2x15 V AC, s výstupním výkonem 2x7,5 VA. Výstupní proud každého vinutí je tedy 500 mA, což je pro naše účely plně dostačující.

Tentýž transformátor bude dále využit i pro vytvoření fantomového napájení 48 V pro kondenzátorové mikrofony, jakožto i pro anodové předpětí pro elektronku. Pro všechny potřebné úrovně napájecího napětí si tedy vystačíme pouze s jedním transformátorem se dvěma shodnými sekundárními

vinutími, který je běžně dostupný.

Na Obr. 12 je zřejmé zapojení symetrického sériového regulátoru s OZ pro vytvoření napájecího napětí ± 15 V. Jako napěťová reference jsou využity obvody TL431, které pro neinvertující vstupy OZ ($IC1$, $IC2$) vytváří referenční potenciál 2,5 V, proud referencemi je omezen odpory $R1$ a $R2$. Na invertující vstupy je přes dělič tvořený odpory $R11$ a $R12$, resp. $R13$, $R14$ v záporné větvi, přivedena porovnávací úroveň výstupního napětí. Pro dokonalé vyhlazení ss napětí jsou v zapojení zdroje použity robustní filtrační kapacity a výstupní RC snubber, na pozicích $C3$ a $C4$ je vhodné užít kondenzátory typu Low-ESR.

Přes hlavní výstupní tranzistory $Q3$ a $Q4$ protéká celý výstupní proud zdroje, který pro napájení obvodů zesilovače odpovídá řádově max. 2x100 mA, ztrátovému výkonu na tranzistorech jsou bohatě dimenzovány i jejich chladiče.



Obr. 12 Schéma zapojení obvodu regulátoru pro stabilizovaný napájecí zdroj

Z prvního sekundárního vinutí transformátoru $TR1$ je vyveden obvod pro vytvoření fantomového napájecího napětí, o kterém pojednává kapitola 4.3.

4.3 Návrh obvodu fantomového napájení

Pro vytvoření zdroje napětí, který ke své funkci vyžadují kondenzátorové mikrofony (jako polarizační předpětí pro mikrofonní kapsli), lze opět využít služby lineárního napěťového regulátoru.

Fantomové napájení nabývá hodnoty 48 V stejnosměrného napětí. Tuto hodnotu je vhodné dodržet (nepřekračovat). Proto na pozici regulátoru $VR3$ je

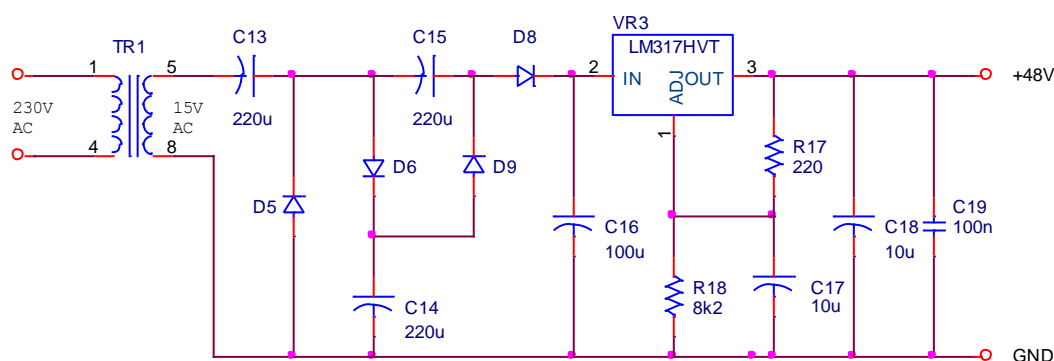
použit nastavitelný typ LM317HVT. Obvod je osazen malým chladičem (*HS3*), neboť s ohledem na regulační úbytek napětí (max. 47 V) a velmi malé výstupní proudy (předpoklad max. 20 mA) je jeho ztrátový výkon do max. 1W.

Pro přesné dostavení výstupního napětí 48 V je na pozici rezistoru R_{17} zvolena hodnota $220\ \Omega$, pro pozici rezistoru R_{18} je použita hodnota odporu dána vztahem:

$$R_{18} = R_{17} \cdot \left(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right) \quad (4.4)$$

$$R_{18} = 220 \cdot \left(\frac{48}{1,25} - 1 \right) = \underline{\underline{8228\ \Omega}} \rightarrow \text{volíme } 8k2 \text{ (řada E24)}$$

Na Obr. 13 je vidět výsledné schéma zapojení regulačního obvodu pro fantomový napáječ pro modelovaný předzesilovač. V zapojení lze pozorovat dvě hlavní modifikace oproti předchozímu zapojení nastavitelného regulátoru použitého u stabilizovaného zdroje žhavení (viz. kapitola 4.1).

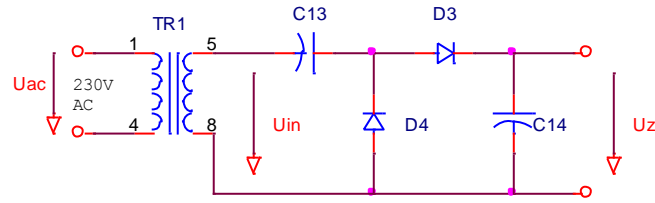


Obr. 13 Schéma zapojení regulačního obvodu pro fantomové napájení

První touto změnou je užití jiného typu regulátoru, pro vytvoření výstupního napětí je použit regulátor typu „HV“ (angl High Voltage). Vyznačuje se stabilizací napětí v rozsahu 1,2 V až 57 V při proudu až 1,5 A [15]. Samozřejmě lze použít i jiný typ regulátoru s rozšířeným rozsahem regulace, nicméně tento je velmi dobře dostupný a jeho dalším kladem je relativně nízký úbytek napětí, který při proudu 1 A činí asi 2 V při 25 °C. Běžný typ LM317T, popřípadě jeho ekvivalentu s běžným rozsahem regulace, nelze použít z důvodu nízkého diferenciálního napětí mezi vstupem a výstupem regulátoru – běžně max. 40 Vdc. Tato hodnota by již byla hraniční pro případy nízkého zatížení

obou stabilizovaných výstupů zdroje, kdy se napětí na sekundárním vinutí použitého transformátoru blíží napětí naprázdno [16].

Druhou modifikací je užití principů tzv. zdvojovačů napětí, kterými je docíleno vytvoření dostatečného předpětí na vstupu regulátoru $VR3$. Užito je Delonova kaskádního zdvojovače, též známé jako Villardovo zapojení násobiče. Tyto sériové půlvlnné násobiče jsou používány jako zdroj vysokého napětí až několik tisíc voltů, ovšem s malým výkonem. Tento princip byl v minulosti hojně využíván v CRT obrazovkách televizních přijímačů.



Obr. 14 Zjednodušené principiální schéma zapojení zdvojovače napětí

Na Obr. 14 je ilustrována funkce půlvlnného zdvojovače napětí, tedy násobiče se dvěma stupni. Vstupní napětí je do násobiče přiváděno z prvního sekundárního vinutí transformátoru $TR1$. Během záporné půlvlny napájecího napětí přes diodu $D8$ prochází proud, který nabíjí kondenzátor $C13$ na vrcholovou hodnotu střídavého napětí z transformátoru, tedy na hodnotu U_{C13} , která je dána vztahem:

$$U_{C13} = \sqrt{2} \cdot u_{in} \quad (4.5)$$

Po příchodu kladné půlvlny dochází k sériovému součtu napětí na sekundárním vinutí transformátoru a nabitého kapacitoru $C13$. Během záporné půlvlny protéká přes diodu $D7$ proud, který nabíjí kondenzátor $C14$ na součet tohoto napětí vyjádřeného jako:

$$U_{C14} = U_{C13} + \sqrt{2} \cdot u_{in} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot u_{in} \quad (4.6)$$

Jelikož je v zapojení na Obr. 14 napětí na zátěži U_z rovno napětí na kondenzátoru $C14$, můžeme výstupní napětí U_z zdvojovače popsat:

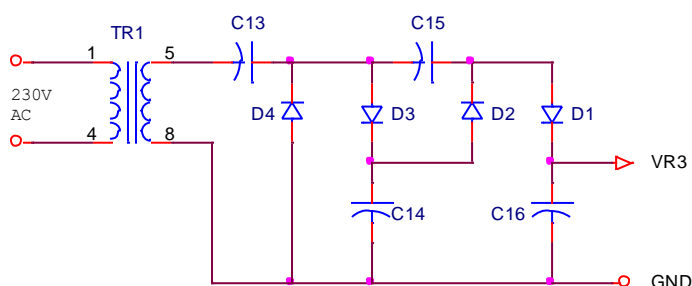
$$U_z = U_{C13} + U_{C14} = 2 \cdot U_{in_{MAX}} \quad (4.7)$$

Hodnota napětí na zátěži U_z je tedy přibližně dvojnásobkem maximální

hodnoty střídavého napětí U_{INmax} transformátoru. To však platí pouze pro nezatížený zdvojovač, v případě vyššího zatížení hodnota výstupního napětí klesá.

Kaskádním řazením lze přidávat další stupně násobiče a zvyšovat konečné napětí. Tento děj však neprobíhá postupně, jak bylo pro lepší názornost popsáno, ale najednou. To znamená, že při příchodu kladné půlvlny se otevírají najednou všechny propustně zapojené diody a probíhá nabíjení všech souhlasně polarizovaných kapacit. Při příchodu půlvlny obrácené polarity se děj opakuje pro všechny opačně polarizované diody a kondenzátory.

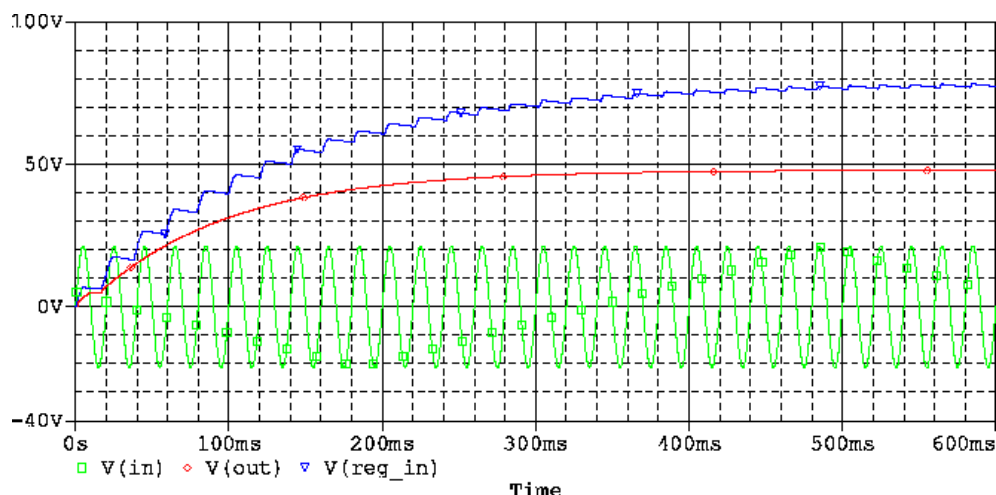
Maximální proud z násobiče dosahuje hodnoty nejvýše v řádu desítek mA v závislosti na počtu stupňů násobiče. Je důležité si uvědomit, že výsledná kapacita do série zapojených kondenzátorů v násobiči se zmenšuje a tím i velikost uchovaného náboje. To má zásadní podíl na velikost proudu tekoucího z výstupu násobiče do zátěže. Čím více stupňů bude násobič obsahovat, tím vyššího napětí lze dosáhnout, avšak s tím klesá schopnost zapojení dodávat proud do zátěže.



Obr. 15 Schéma zapojení kaskádního násobiče se čtyřmi stupni

Jak zobrazuje Obr. 15, pro naše účely fantomového napájecího zdroje bylo využito čtyř stupňů násobiče tak, aby vstupní napětí regulátoru bylo dostatečně vysoké pro pokrytí zátěžových špiček z výstupu zdroje. Zároveň bylo třeba zohlednit rozptyl napětí na sekundárním vinutí transformátoru vlivem časově proměnné zátěže a zapojení dimenzovat pro případy stavu naprázdno i plného zatížení.

Simulace náběhu zdroje pro fantomové napájení je vyobrazena na Obr. 16. Vidíme, že stabilní napětí 48 V se na výstupu regulátoru (červený průběh) objeví až po 500 ms, které jsou potřeba pro nabití všech kapacit v obvodu násobiče (modrý průběh).



Obr. 16 Simulované průběhy rozběhu obvodu zdroje fantomového napájení

U použitého zapojení násobiče lze po započtení zvlnění a všech úbytků napětí v obvodu získat výsledné napětí na vstupu stabilizátoru *VR3* až 95 V stejnosměrného vyhlazeného napětí (změřeno) při nezatíženém stavu, a to včetně nezatížených obou sekundárních vinutí transformátoru *TR1*.

Výhodou púlvlenných násobičů je i fakt, že mají jeden pól výstupního napětí spojený s jedním vývodem střídavého zdroje, v našem případě střed dvou sekundárních vinutí transformátoru *TR1*. Toto umožňuje zajistit na výstupu fantomového napáječe stejnou „zem“ jakou je u celého napájecího zdroje, potažmo celého předzesilovače.

4.4 Napájení anod elektronky

Jak již bylo nastíněno v předchozích kapitolách práce, celé zapojení signálové části je obzvláště vhodné pro osazení dvojitou vakuovou triodou ECC88 (E88CC, popř. její americký ekvivalent 6DJ8). Z její anodové a převodní charakteristiky (viz. Obr. 7) je zřejmé, že i při anodovém napětí pod 50 V zmíněná trioda i při velkých vstupních signálech pracuje stále v lineární oblasti, tedy s minimálním zkreslením. Naopak při použití této triody bude slyšitelné měkké zkreslení již malých amplitud vstupního signálu, cca. $>0,5$ V (resp. napětí $-0,5$ V na mřížce triody) [12].

Fantomové napájecí napětí lze tak směle použít i pro napájení obou anod elektronky v obvodu předzesilovače.

Triody ECC81, ECC82, ECC83 i ECC88 mají totožné rozložení vývodů patice, takže při shodném anodovém napětí 48 V je tedy technicky možné tyto

elektronky v patici PCB zaměňovat a otestovat tak zvukový charakter každé ze jmenovaných. Je tomu však třeba přizpůsobit zdroj žhavení (viz. kapitola 4.1).

5 NÁVRH SIGNÁLOVÉ ČÁSTI ZESILOVAČE

Zvolené obvodová koncepce mikrofonního předzesilovače představuje kompromis mezi jednoduchostí, univerzálností, ale také funkčností s možností doladění během vlastní konstrukce zařízení. Zároveň je zapojení tvořeno běžně dostupnými součástkami a většina dílčích prvků předzesilovače je často využívána i profesionálními výrobci především nástrojových aparátů, za všechny jmenujme Fender, Marshall, Randall, VOX, atp.

Při vlastním návrhu obvodového zapojení tedy byly upřednostněny již zaběhlé a ověřené obvodové řešení před experimentálními postupy, které (jak historie prokázala) se u profesionálních hudebníků zpravidla neujímají. Dále pak s pomocí katalogových listů, doporučení výrobců komerčně vyráběných zařízení bylo nalezeno výsledné zapojení signálové části, tedy srdce vlastního předzesilovače.

Signálovou část zesilovače je tvořena několika dílčími bloky (viz Obr. 1). Celá koncepce předzesilovače je volena jako třístupňová, tj. první stupeň je tvořen audio – operačními zesilovači, za tento obvod je zařazen elektronkový stupeň, koncová část předzesilovače je tvořena dvojicí audio – operačních zesilovačů pro přizpůsobení zatěžovací impedance pro triodu a výstupního signálu.

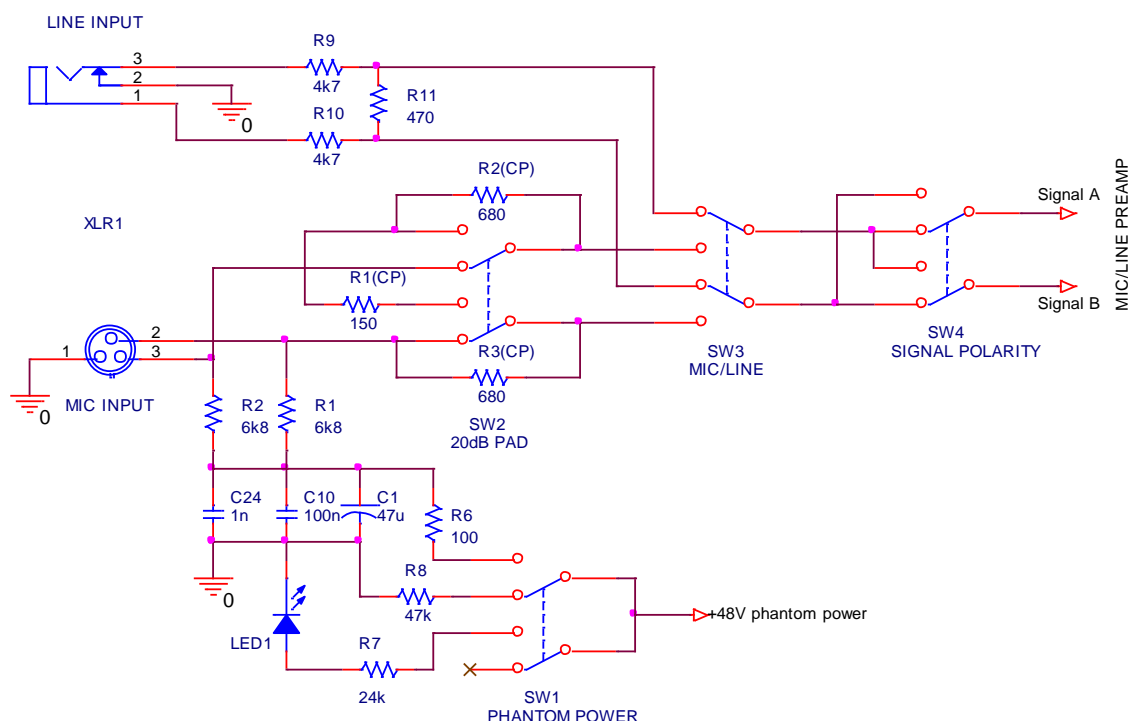
Celý obvod je dle zadání opatřen symetrickým mikrofonním vstupem s přepínatelným linkovým symetrickým vstupem, nástrojovým nesymetrickým vstupem s vysokou impedancí, symetrickým i nesymetrickým výstupem, indikátorem vybuzení elektronky, možností přepnutí polarity signálu, a útlumovým článkem. Do zapojení je zakomponována možnost zařazení oddělovacích audio transformátorů, a to jak na vstup, tak i výstup zařízení. Pro nastavení parametrů zvuku je předzesilovač opatřen regulací vstupního zisku, nastavením přebuzení elektronky (tj. symetrie mezi triodami), ovládáním celkového mixu (tj. poměr čistého a zkresleného kanálu) a samozřejmě i nastavením výstupní hlasitosti.

5.1 Vstupní část zesilovače

Vstupní signálovou část předzesilovače můžeme pro lepší názornost rozdělit na několik dílčích bloků.

5.1.1 Konektivita a ovládání funkcí

První úsek je tvořen vstupními přepínatelnými konektory, spínatelným útlumovým článkem, přepínačem polarity a oddělovacím audio transformátorem (volitelná součást). Konkrétní zapojení všech komponent tohoto úseku je patrné z Obr. 17.



Obr. 17 Schéma zapojení vstupní signálové části

Vstupní signál je připojen na kombinovaný XLR – Jack 1/4“ konektor. Jedná se o dnes u hudebníků populární „combo“ konektor, který lze využít zároveň jako mikrofonní i jako linkový vstup, přičemž oba vstupy jsou rozlišeny jiným typem připojovaného konektoru (XLR – symetrický mikrofonní vstup; Jack 1/4“ – symetrický linkový vstup). Oba vstupy jsou mimo výše jmenované rozlišeny vstupní impedancí. Vlastní výběr vstupu je volen přepínačem SW3. Za konektorem následuje spínač SW1, který aktivuje fantomové napájení připojitelného mikfonu. Přepínač SW2 připojuje do mikrofonní signálové cesty útlumový článek (-20 dB). Přepínání polarity signálu zajišťuje přepínač SW4.

Všechny tlačítkové spínače ($SW1-SW5$) jsou umístěny na samostatné DPS, sloužící jako ovládací panel. Rozhraní vstupní a mikrofonní předzesilovací části je přizpůsobeno pro možnost připojení oddělovacího transformátoru ($NTE4$).

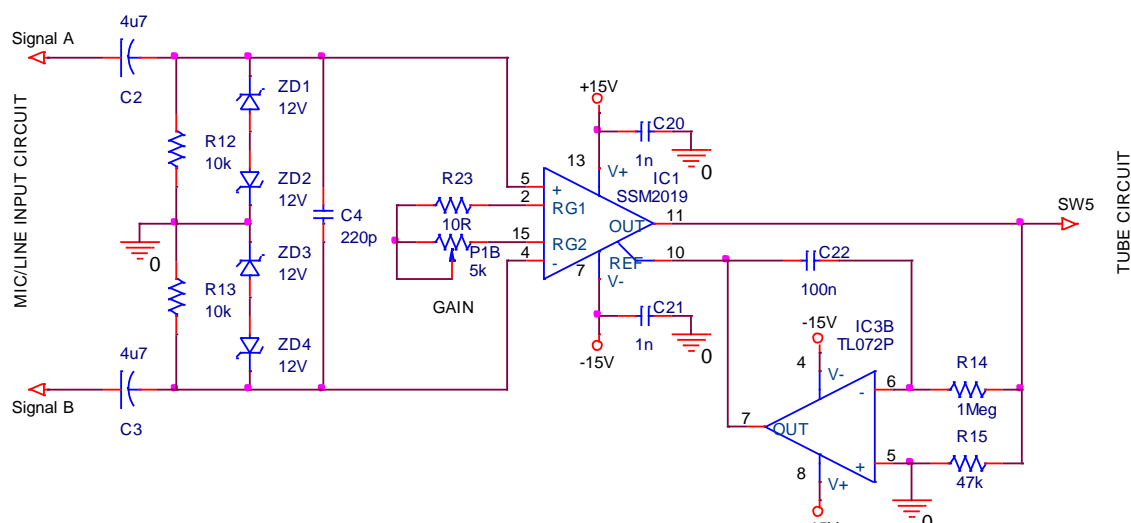
5.1.2 Mikrofonní/linkový kanál

Druhým blokem je předzesilovací část pro mikrofonní (resp. linkový) kanál. Srdcem této části je jakostní audio operační zesilovač předurčený pro mikrofonní aplikace.

Skrze oddělovací kapacity je signál přiveden pře oddělovací kapacity $C2$, $C3$ na oba vstupy mikrofonního operačního zesilovače. Zesílení OZ můžeme upravit prostřednictvím potenciometru $P1$ – toho je třeba využít při režimu, kdy se na vstup připojí signály např. velmi nízké linkové úrovně. Potenciometr $P1$ zároveň určuje úroveň vstupního signálu přivedeného na mřížku první triody. Mezi výrobci hudebních aparátů se pro tento regulátor vžilo označení „Gain“, neboli zisk.

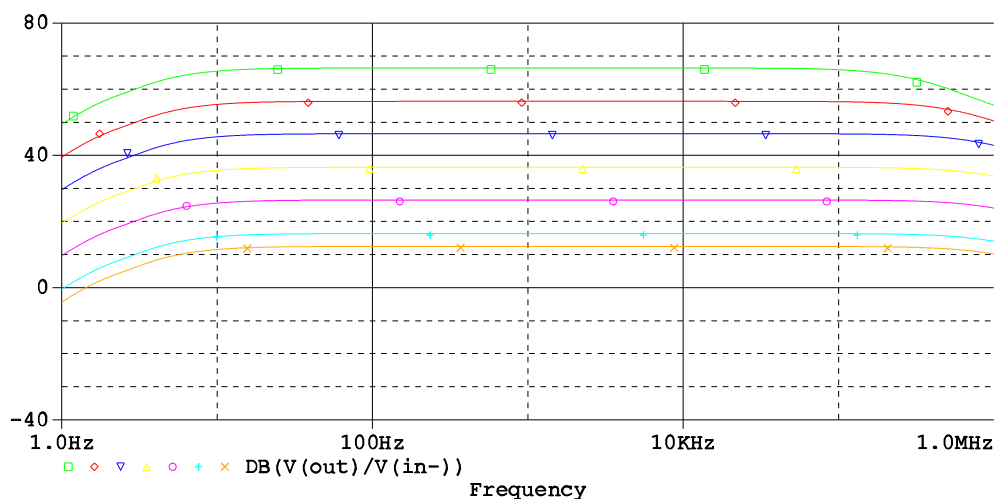
Mezi výstup audio obvodu $IC1$ (OUT) a referenční vstup (REF) je připojeno DC servo tvořené zapojením s FET operačním zesilovačem $IC3$ (TL072P). Touto cestou můžeme z výstupního audio signálu účinně odstranit DC offset a můžeme si tak dovolit vynechat oddělovací kondenzátory v signálové cestě.

Na Obr. 18 je ilustrováno schéma zapojení předzesilovací části, jejíž topologie vychází z typického katalogového zapojení audio obvodu SSM2019 ($IC1$) [17].



Obr. 18 Schéma zapojení předzesilovací části pro kanál mikrofon/linka

Maximální zisk mikrofonního kanálu je asi 66 dB ve frekvenčním rozsahu 4 Hz – 264 kHz (pro -3 dB) jak dokládá frekvenční charakteristika na Obr. 19.

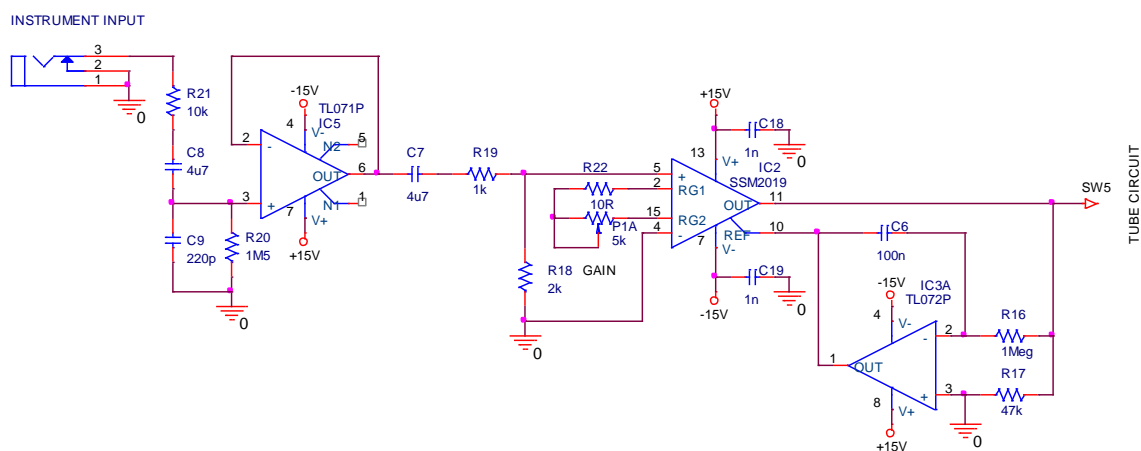


Obr. 19 Průběh frekvenčních charakteristik mikrofonního kanálu pro různé hodnoty zisku

5.1.3 Nástrojový kanál

Posledním dílčím blokem vstupní signálové části je kanál předzesilovače příslušný pro vysokoimpedanční nástrojový vstup. Zapojení využívá stejný typ aktivních prvků, což je výhodné vzhledem k ziskovým a šumovým poměrům. Zároveň je tak pro ovládání hodnoty zisku možné použít jeden tandemový potenciometr (označen *P1A*, *P1B*) pro oba kanály najednou.

Vlastní elektrické zapojení kanálu předzesilovače pro připojení nástroje je vyobrazeno na Obr. 20.

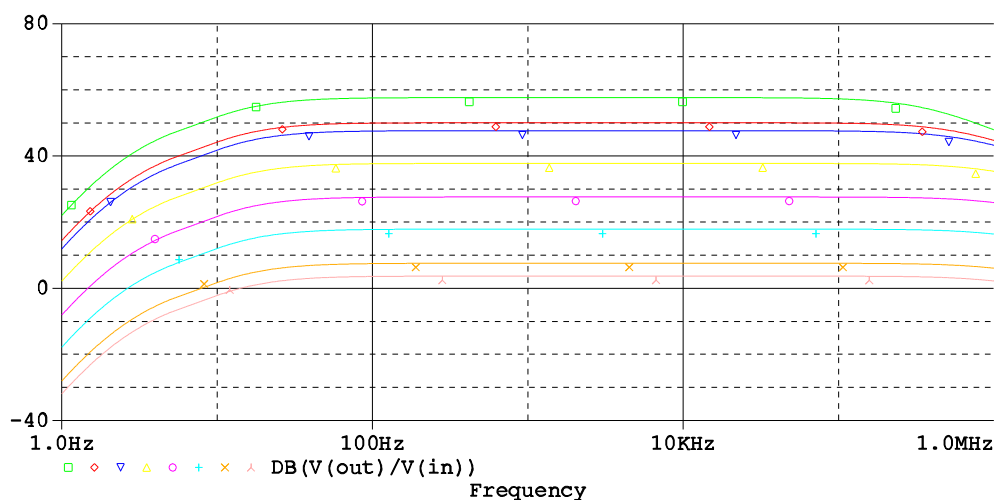


Obr. 20 Schéma zapojení předzesilovací části nástrojového kanálu

Mimo vstupního konektoru je oproti mikrofonnímu kanálu rozdíl především v použití napěťového sledovače za vstupem. Ten je zodpovědný za vytvoření vysoké vstupní impedance potřebné pro připojení nástrojových snímačů zvuku (cívkové, piezoelektrické, aj.), které se vyznačují velice nízkou úrovní signálu vyžadující zároveň i vysoký zisk zesilovacího prvku.

Na výstupu obvodu *IC2* je stejně jako v minulém případě připojeno DC servo, tvořené zapojením integrovaného obvodu *IC3*.

Nejvyšší zisk nástrojového kanálu je asi 56 dB ve frekvenčním rozsahu 11 Hz – 329 kHz (pro -3 dB) jak dokládá frekvenční charakteristika na Obr. 21.

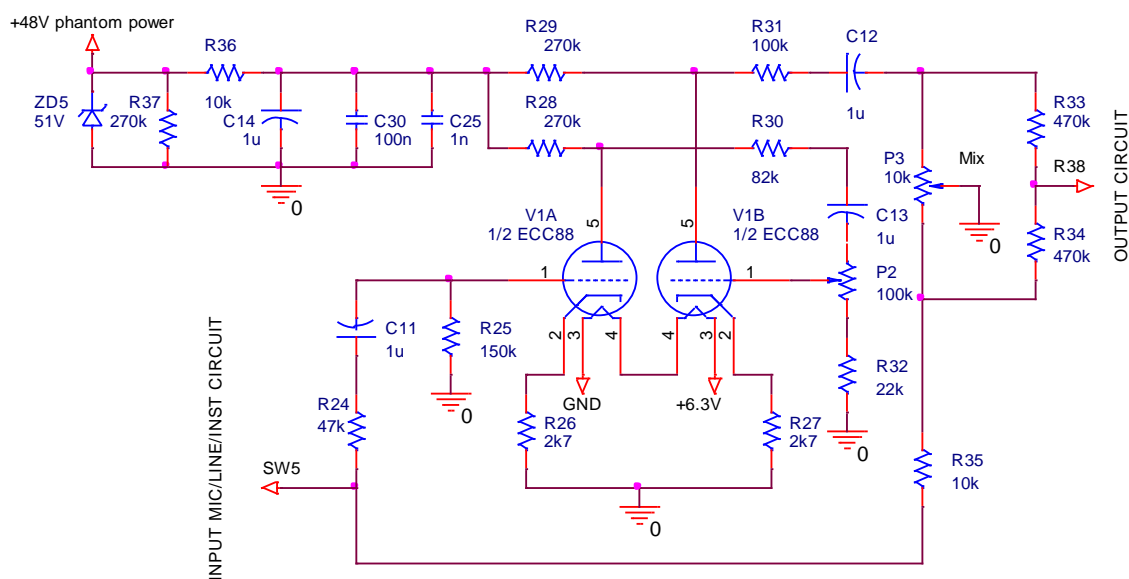


Obr. 21 Průběh frekvenčních charakteristik nástrojového kanálu pro různé hodnoty zisku

Přepínání mezi kanálem mikrofon/linka a nástrojovým kanálem je realizováno pomocí jednoduchého dvojpólového přepínače *SW5*, který je spolu s ostatními spínači umístěn na ovládacím panelu. Nevyužitý přepínací kontakt přepínače našel uplatnění pro světelnou indikaci zvoleného vstupu pomocí LED diod (*LED2*, *LED3*).

5.2 Lampová část zesilovače

Klíčová část předzesilovače osazená dvojitou triodou je s oblibou používána v kytarových lampových zesilovačích a především v pololampových kytarových kombech. Využity jsou obě části ECC88, žhavicí vlákna jsou zapojena do série. Vstupní signál z první sekce je přiveden přes oddělovací kapacitu na mřížku první triody, výstupní signál je odebrán přes odpor *R24* a oddělovací kondenzátor *C11* z anody. Poměr vybuzení druhé triody a tím i charakter výsledného zvuku je možné ovlivnit pomocí potenciometru *P2*. Anodové napájecí napětí je na triody přivedeno přes anodové zatěžovací odpory o hodnotách 270 k Ω . Zapojení lampové části zesilovače je patrné z Obr. 22.

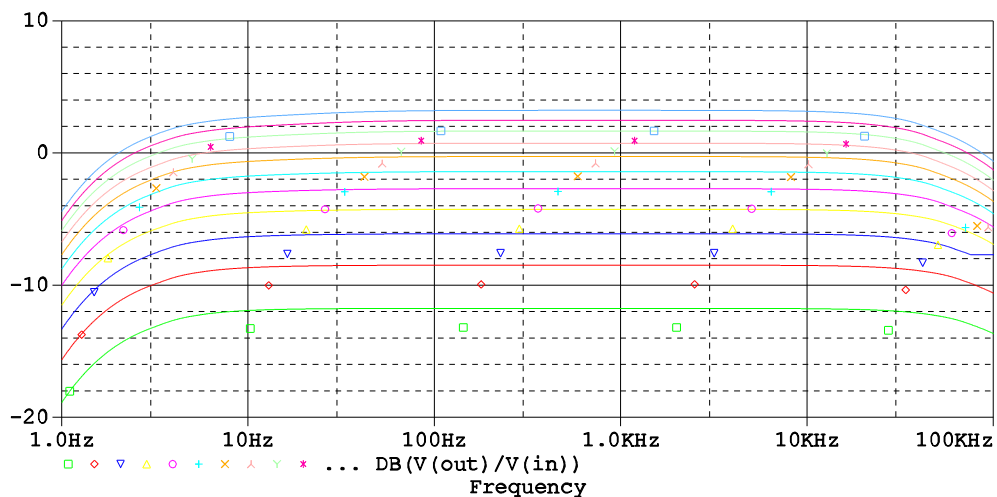


Obr. 22 Schéma zapojení elektronkové části předzesilovače

Potenciometr *P3* spolu se dvěma odpory *R33* a *R34* vytváří míšící člen („Mix“), který polohou běžce potenciometru rozhoduje o podílu „čistého“ signálu ze vstupní předzesilovací části a signálu zkresleného elektronkami. Tímto ovládacím prvkem je možné získat zajímavý charakter zvuku nebo vybrat pouze čistý nebo pouze zkreslený kanál. Takto smíchaný signál putuje do výstupní

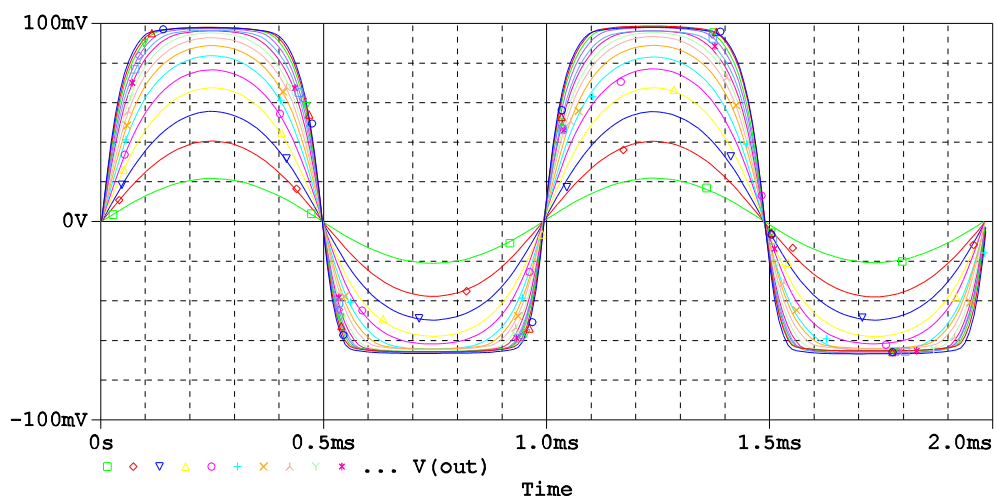
obvodové části.

Simulacemi zjištěný frekvenční rozsah pro navrženou lampovou část zesilovače je patrný z Obr. 23 a odpovídá hodnotě 1,5 Hz – 63 kHz (-3 dB). Dle očekávání má tedy výrazně užší šířku pásma oproti prvnímu stupni s operačními zesilovači.



Obr. 23 Průběh frekvenčních charakteristik elektronkové části pro různé hodnoty zisku

Pomocí parametrické analýzy v časové oblasti můžeme na zjištěných průbězích pozorovat různý charakter zkreslení výstupního signálu lampové části zesilovače. Při použitím rozmítání sinusového vstupního signálu v rozsahu 100 mV – 1,5 V po 100 mV při frekvenci 1 kHz pozorujeme v Obr. 24 pozvolný přeběh z lineární oblasti (zelený průběh) do stavu přebuzení – měkké limitace.



Obr. 24 Průběh parametrické časové analýzy pro různé úrovně vstupního signálu elektronkové části zesilovače – měkká limitace

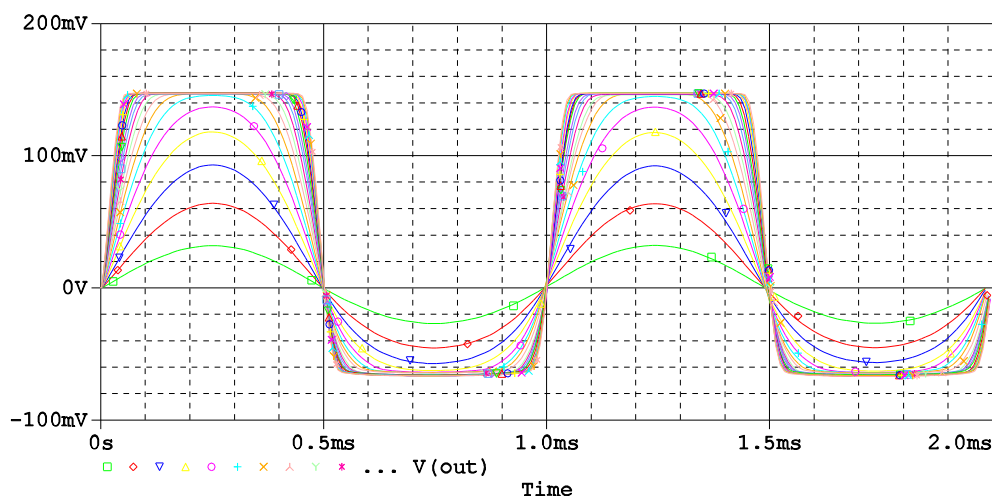
I nejvíce limitovaný průběh neobsahuje žádné ostré přechody, ve spektru se

tento jev projeví malým počtem harmonických, dominantní je především druhá, třetí a čtvrtá harmonická.

Zároveň průběh demonstruje funkci potenciometru $P2$ (symetrie). Při zmíněné analýze se nacházel v pozici 0° (minimum), dochází tedy k přebuzení pouze první poloviny elektronky ECC88, druhá polovina triody pracuje nyní stále v lineárním režimu.

Při dalším rozmítání sinusového vstupního signálu v rozsahu 25 mV – 0,5 V po 25 mV při frekvenci 1 kHz pozorujeme strmější přechod do oblasti zkreslení. Je za to zodpovědné nastavení potenciometru $P2$, nyní je v poloze 270° (maximum). Při tomto naladění pracuje i druhá polovina ECC88 v zakřivené oblasti své přenosové charakteristiky. První polovina triody ($V1A$) se při této analýze pozvolna dostává do oblasti limitace, takto zkreslený signál je z její anody odveden v maximální nastavitelné úrovni na druhou mřížku triody ($V1B$), která začíná rovněž zkreslovat výstupní signál.

Výše popsané chování elektronkové části dokumentuje výstupní průběh získaný ze simulačního programu zachycený na následujícím Obr. 25.



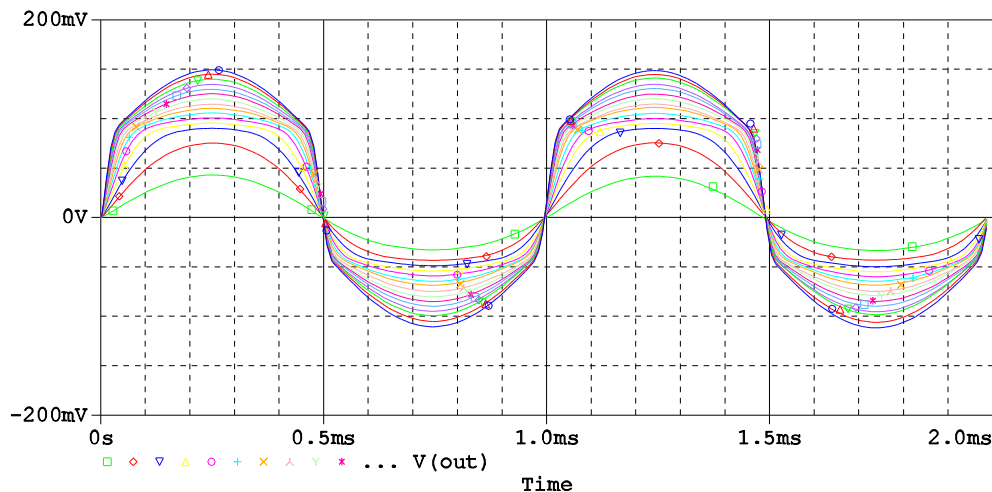
Obr. 25 Průběh parametrické časové analýzy pro různé úrovně vstupního signálu elektronkové části zesilovače – tvrdá limitace

Na něm si můžeme povšimnout, že výsledkem dvojité limitace obou částí triody je silněji zkreslený průběh, který se již začíná podobat zkreslení známého z polovodičů – tvrdé limitaci.

Ostřejší přechody se projevují výrazněji ve spektru výstupního signálu, kdy se zvyšuje počet vyšších spektrálních složek, dominantními jsou přitom třetí a pátá harmonická.

V následující analýze je demonstrována funkce potenciometru $P3$ (mix). Jak

již bylo řečeno, nastavení tohoto směsného prvku udává poměr čistého a zkresleného kanálu. V jeho krajních polohách (0° a 270°) je volen pouze jeden z nich, druhý je tak uzemněn. Nastavením tohoto prvku na střed jeho odporové dráhy (úhel otočení zhruba 135°) a výsledný získaný průběh takto smíchaného signálu ilustruje Obr. 26.



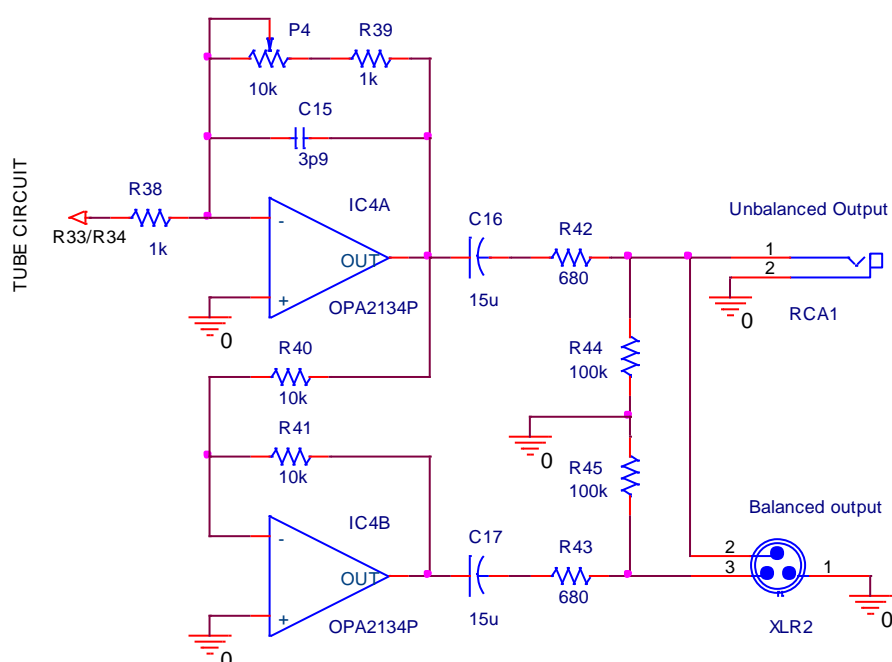
Obr. 26 Průběh parametrické analýzy pro různé úrovně vstupního signálu s využitím funkce mix

5.3 Koncová část předzesilovače

Výstupní stupeň předzesilovače je, rovněž jako první stupeň, polovodičový. Operační zesilovač zde vytváří vysokou vstupní impedanci jakožto zátěž dvojité triody $V1$. Zesílený a volitelně zkreslený signál putuje na invertující vstup operačního zesilovače OPA2134 ($IC4A$). Jeho zisk je dán kombinací odporů $R38$, $R39$ a především potenciometrem $P4$, kterým tak lze regulovat výstupní hlasitost předzesilovače.

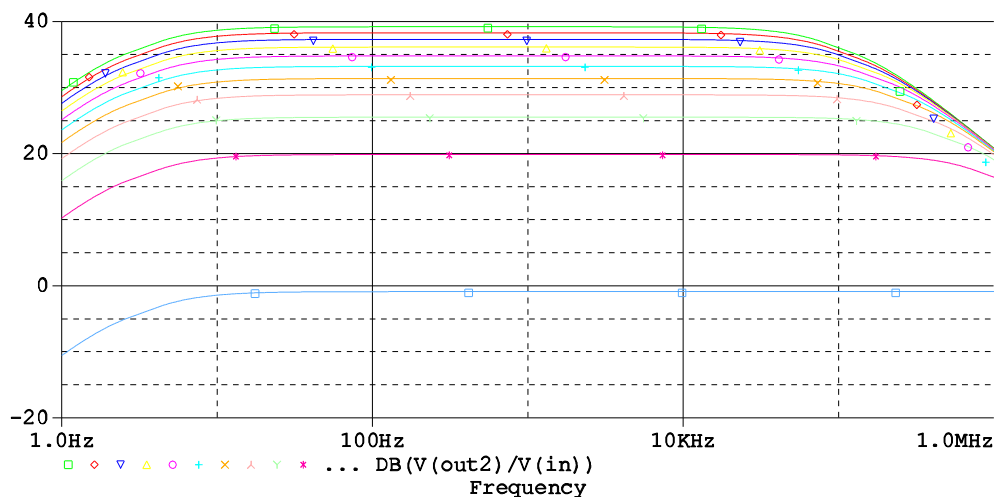
Z jeho výstupu je signál veden na invertující zesilovač tvořený druhou polovinou OZ ($IC4B$). Jeho zesílení je dáno poměrem odporů $R40$ a $R41$ (je tedy rovno jedné) a slouží zde pro vytvoření výstupního invertovaného signálu pro třetí pin symetrického výstupního konektoru $XLR2$. Naopak konektor $RCA1$ je nesymetrický, oba konektory jsou situovány na zadní panel skříně předzesilovače.

Výsledné schéma zapojení výstupní části zesilovače je patrné z Obr. 27.



Obr. 27 Schéma zapojení koncové části předzesilovače

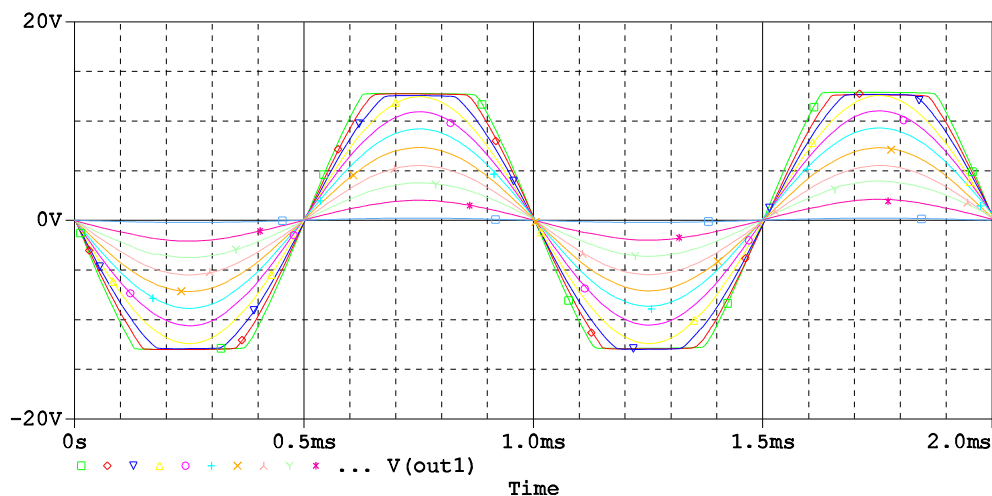
Frekvenční charakteristika koncového stupně je viditelná na Obr. 28. Z průběhu byl odečten maximální zisk zapojení 39 dB při rozsahu kmitočtového pásma 3 Hz – 87 kHz (pokles -3dB).



Obr. 28 Průběh frekvenčních charakteristik koncové části pro různé hodnoty zisku

Při porovnání kmitočtových rozsahů všech zesilovacích částí zapojení (vstupní s OZ, střední s triodou, výstupní s OZ) docházíme k závěru, že nejužší pásmo pokrývá prostřední stupeň osazený elektronkou, a to 1,5 Hz – 63 kHz. Vzhledem k rozsahu slyšitelného audio pásma 20 Hz – 20 kHz se jedná o zcela dostatečnou hodnotu.

Z Obr. 29 můžeme sledovat rozdíl v charakteru limitace koncového, tedy polovodičového stupně oproti průběhům zkreslených elektronkou. Dále lze odečíst výstupní dynamický rozsah předzesilovače, který činí 25 V_{p-p}.



Obr. 29 Průběh parametrické časové analýzy pro různé úrovně vstupního signálu koncové části zesilovače - ostrá limitace

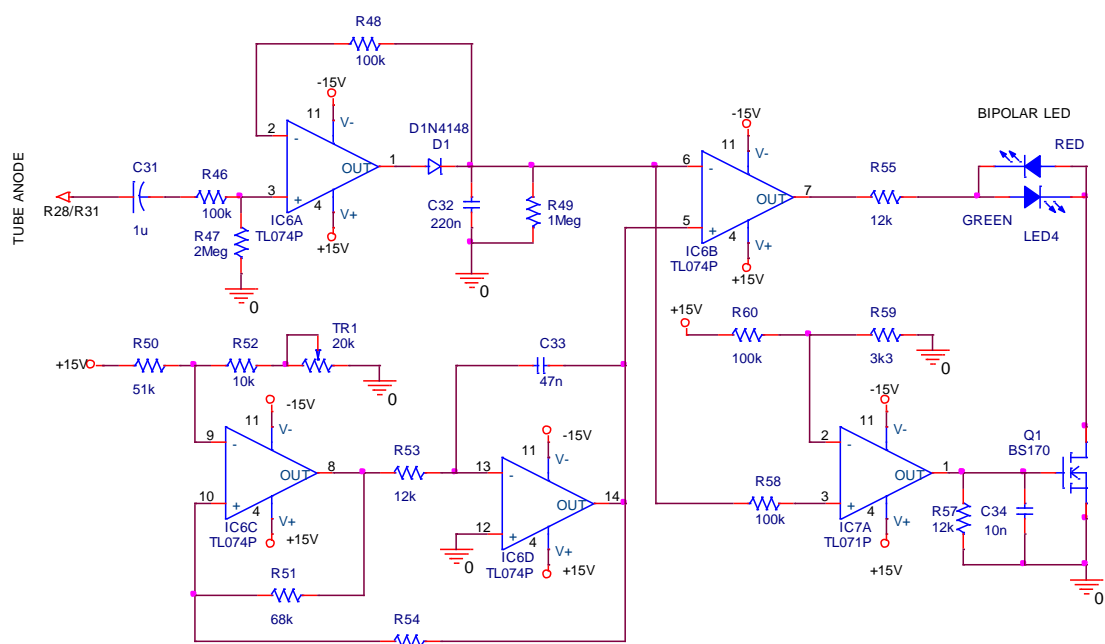
Pro názornost je vyobrazen průběh pouze z operačního zesilovače *IC4A*, zobrazený průběh je tedy nesymetrický. Symetrický výstup obsahuje navíc průběh inverzní k výše zobrazenému na Obr. 29.

5.4 Indikátor vybuzení

Pro světelnou indikaci vstupní úrovně signálu, popř. vybuzení zesilovače, lze použít celou řadu známých integrovaných obvodů pro řízení svitu různého počtu světelných diod LED. Vzhledem ke konstrukční složitosti a omezené ploše čelního panelu skříně zesilovače bylo však třeba přistoupit k jednoduchému, ale zároveň efektnímu řešení.

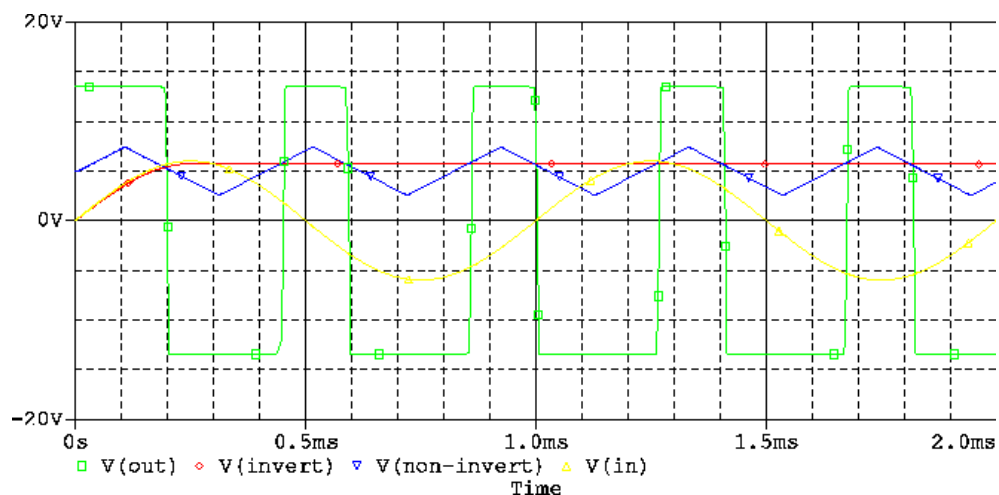
V našem případě bude použito zapojení, které pracuje s pouze jednou dvoubarevnou bipolární LED diodou. Indikace síly signálu je pak zastoupena plynulou změnou barvy diody, od světle zelené, přes sytě oranžovou až po tmavě rudou.

Elektronický obvod na Obr. 30 je možno připojit buď na anodu některé z triod, nebo např. na výstupní či vstupní sekci předzesilovače. V případě tohoto zesilovače bude po vzoru kytarových aparátů pomocí změny barvy LED indikována velikost vybuzení elektronky (tzv. „Drive“).



Obr. 30 Schéma zapojení obvodu indikátoru vybuzení

Všechny získané průběhy v obvodu indikátoru můžeme sledovat na simulaci zachycené v Obr. 31. Užitečný signál vyvedený z anody triody *V1B* je přiveden na vstup napěťového sledovače *IC6A* (žlutý průběh). Výstupní signál je pak jednoduše usměrněn a vyhlazen pomocí *D1* a *C32* (červený průběh). Tato ss hodnota napětí dává obraz o síle vybuzení elektronky, který je následně na vstupu *IC6B* komparován s pilovitým průběhem (modrý) generovaným pomocí obvodů *IC6D* a *IC6C*. Offset generátoru pilovitého signálu můžeme měnit pomocí trimru *TR1* a definovat tak referenční úroveň pro indikaci přebuzení. Na výstupu komparátoru tak dostáváme průběh (zelený), který pomocí změny šířky pulzu (PWM řízení) v obou polaritách rozsvěcuje příslušnou barvu použité bipolární LED diody.



Obr. 31 Simulované průběhy v obvodu indikátoru vybuzení

Vzhledem k použitému vyhlazení a vysokému kmitočtu PWM signálu není možné okem pozorovat „blikání“ diody, naopak změna barvy se jeví jak pozvolná. Zapojení s druhým komparátorem *IC7A* zajišťuje zhasnutí LED diody v případě slabého vybuzení elektronky či situace, kdy se zesilovač nachází v aktivním stavu bez připojeného signálu.

6 VÝSLEDNÉ PARAMETRY ZAŘÍZENÍ

Pro objektivní posouzení dosažených výsledků bylo využito experimentálního měření, které mimo jiné slouží pro porovnání výsledků získaných obvodovými simulacemi.

6.1 Elektrické parametry získané měřením

Vstupní impedance ($f=1$ kHz, $U_{IN}=1,0$ V_{P-P}):

- Linkový symetrický vstup (Jack 1/4") 10 kΩ
- Mikrofonní symetrický vstup (XLR) 3,9 kΩ
- Nástrojový nesymetrický vstup (Jack 1/4") 1,5 MΩ

Výstupní impedance ($f=1$ kHz, $U_{IN}=1,0$ V_{P-P}, $R_G=100$ kΩ):

- Linkový nesymetrický výstup (RCA) 100 kΩ
- Linkový symetrický výstup (XLR) 100 kΩ

Frekvenční rozsah (pro pokles -3 dB, $U_{IN}=1,25$ V_{P-P}):

- Čistý kanál (OZ) 12 Hz – 68 kHz
- Lampový kanál (ECC88) 15 Hz – 45 kHz

Dynamický rozsah: 25 V_{P-P}

($f=20$ kHz, $U_{IN}=1,25$ V_{P-P}, gain 100%)

Rychlost přeběhu SR: 5,5 V/μs

($f=20$ kHz, $U_{IN}=1,25$ V_{P-P}, $U_{OUT}=25$ V_{P-P}, gain 100%)

Celkové harmonické zkreslení THD+N: 0,034 %

($f=1$ kHz, $U_{IN}=100$ mV_{P-P}, $R_G=100$ kΩ, gain 50%, THD+N_{GEN}=0,0003 %)

6.2 Průběhy získané měřením

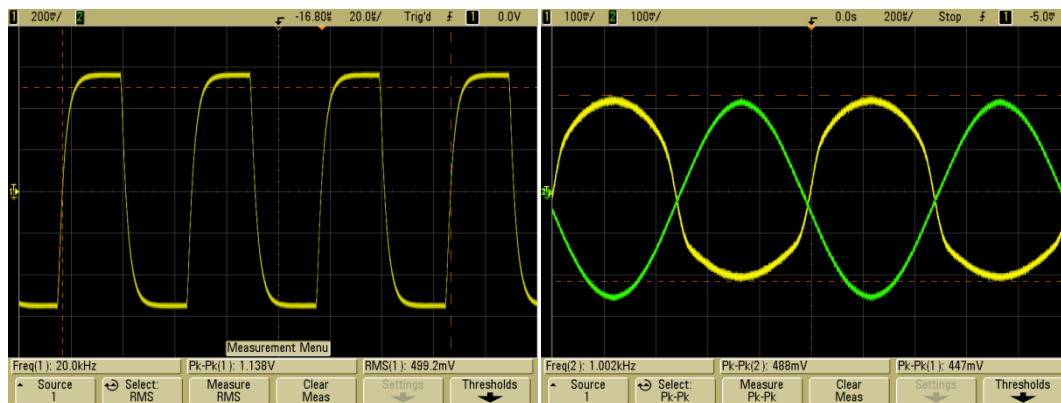
V následujících zobrazených průbězích je vstupní signál vyznačen zeleně, výstupní pak žlutě.



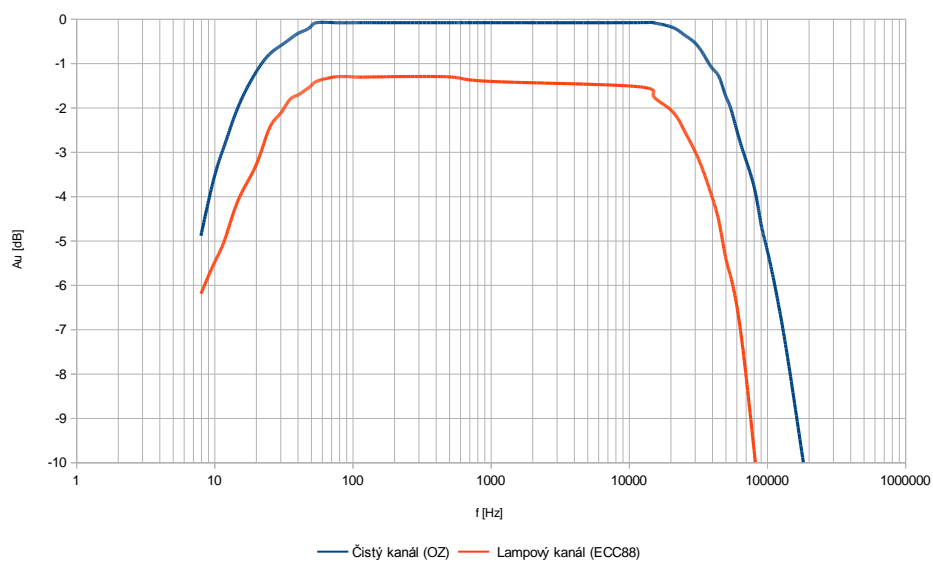
Obr. 32 Měření výstupního dynamického rozsahu (vlevo) a rychlosti přeběhu (vpravo)



Obr. 33 Výstupní signál v limitaci - měkké (vlevo), tvrdé (vpravo)



Obr. 34 Demonstrace stability zesilovače (vlevo) a funkce mix (vpravo)



Obr. 35 Změřená modulová kmitočtová charakteristika předzesilovače

7 ZÁVĚR

V této práci byly popsány mikrofonní předzesilovače, jejich obvodové koncepce, typická zapojení a byly nastíněny současné trendy v tomto odvětví audio techniky. Součástí diplomové práce je i stručný teoretický úvod do problematiky implementace vakuových prvků do jindy zpravidla polovodičových audio obvodů. Na základě elektrických vlastností a chování elektronek v nf obvodech bylo možné prezentovat několik nejpoužívanějších typů vakuových triod a nastínit jejich zvukový charakter při konkrétním osazení do obvodů předzesilovačů. Při návrhu nf obvodů bylo taktéž přihlášeno ke stále používaným obvodovým koncepcím renomovaných výrobců nástrojové techniky.

Pro modelovaný předzesilovač byla navržena zdrojová napájecí jednotka, která při zachování univerzálnosti a použití dostupných součástek nabízí všechna potřebná napájecí napětí pro elektronkový předzesilovač. Signálová část zesilovače se sestává ze třech hlavních částí, kdy vstupní i výstupní sekce je tvořena obvody s operačními zesilovači, mezi které je vložen stupeň osazený dvojitou vakuovou triodou. Pro klíčové prvky zesilovače byly pro návrh použity ověřené a jakostní součástky, které poskytují vysokou míru spolehlivosti, dostupnosti spolu s pozitivními ekonomickými aspekty.

Díky zvolené topologii nabízí mikrofonní zesilovač možnost ovládání měkké či tvrdé limitace elektronkou, regulaci výstupního mixu, ovládání hlasitosti nezávisle na úrovni zkreslení či změnu polarity a utlumení vstupního signálu. Zařízení je taktéž doplněno kvalitními obvody pro fantomové napájení elektrostatických mikrofónů. Zařízení nabízí i variantu zapojení symetrických i nesymetrických vstupů a výstupů, navržený předzesilovač tak umožňuje spolupráci s širokým spektrem studiové, nástrojové a nahrávací techniky.

Navržený předzesilovač by měl splňovat všechny nároky vytyčené zadáním práce. Chování klíčových signálových obvodů bylo ověřeno v simulačním softwaru OrCAD/PSpice, do jehož procesoru však bylo třeba implementovat přesné modely vakuových prvků. Při obvodových simulacích bylo ve větší míře využito parametrických analýz k názornému posouzení odchylek výstupních průběhů. Dále se podařilo vytvořit všechny návrhové a konstrukční podklady v programu Eagle.

Je však třeba brát ohled na fakt, že simulační software neuvažuje další elektrické jevy, které mohou nastat při reálném provozu hudebního zařízení. Dalším faktorem ovlivňujícím přesnost analýz je uvážení ideálních přenosových

a provozních podmínek, kdy např. nejsou zohledněny negativní dopady plošných spojů (PCB) či elektromagnetického rušení (EMC) a dalších jevů, které nelze předvídat. Tyto faktory se u vysokonapěťových vakuových prvků uplatňují v mnohem větší míře, než je tomu u polovodičových součástek.

Navržené zařízení bylo zrealizováno formou funkčního prototypu, zabudováno do kovové přístrojové skříně a v součinnosti moderních metod podrobena experimentálnímu měření pro zjištění skutečných charakteristik a parametrů. Vzhledem k širokým možnostem individuálního nastavení předzesilovače pomocí regulačních prvků se pro nejlepší posouzení kvalit zařízení ukázalo využítí poslechového testu, kdy bylo možné přisoudit zvukový dopad konkrétnímu nastavení obvodu.

Při porovnání dosažených parametrů navrhovaného zařízení s komerčními výrobky docházíme k závěru, že výsledný předzesilovač splňuje všechny kvalitativní nároky i nad rámec požadavků vytyčených zadáním práce. Zařízení se tak díky svým vlastnostem může poměřovat i s profesionální studiovou elektronikou.

Především však realizovaný předzesilovač umožnil praktické ověření teoretických předpokladů pro popis chování polovodičových a vakuových prvků v oblastech limitace a jeho vlivu na výsledný zvukový charakter. Tento fakt pokládám za jeden z hlavních přínosů diplomové práce.

LITERATURA

- [1] ROCHELT, K. High-End elektronkový předzesilovač EP 1. Praktická elektronika A Radio. 2001, roč. 6, č. 8, s. 11. ISSN 1211-328X.
- [2] ČACKÝ, A. *Hybridní sluchátkový zesilovač pro vysoce jakostní poslech*. Bakalářská práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012
- [3] VORÁČEK, V. Amatérská hudební elektronika. Konstrukční elektronika A Radio. 2003, roč. 8, č. 6, s. 3-40. ISSN 1211-3557.
- [4] PANENKA, P.J. O zkreslení. Praktická elektronika A Radio. 2006, roč. 11, č. 12, s. 25-27. ISSN 1211-328X.
- [5] PANENKA, P.J. O zkreslení 2. Praktická elektronika A Radio. 2007, roč. 12, č. 9, s. 25-27. ISSN 1211-328X.
- [6] SMETANA, C. a kol. *Praktická elektroakustika*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1981.
- [7] CHOBOT, L. *Nízko-frekvenční elektronkový předzesilovač*. Bakalářská práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008
- [8] VLACH, J. *Lampárna, aneb co to zkusit s elektronkami?* Praha, BEN, 2004.
- [9] SCHIMEL, P. Tubes Versus Solid-State Audio Amps – The Last Word [on-line]. Vydáno 30.11.2011. [citováno 6. prosince 2013]. Dostupné z: <http://electronicdesign.com/analog/tubes-versus-solid-state-audio-amps-last-word-or-house-fire-part-2>
- [10] JJ Electronic [on-line]. Datasheet ECC83 – *R.F. Double Triod* [citováno 6.12.2013]. Dostupné z: <http://www.jj-electronic.com/pdf/ECC%2083%20S.pdf>
- [11] JJ Electronic [on-line]. Datasheet ECC82 – *R.F. Double Triod* [citováno 6.12.2013]. Dostupné z: <http://www.jj-electronic.com/pdf/ECC%2082.pdf>
- [12] JJ Electronic [on-line]. Datasheet E88CC – *R.F. Double Triod* [citováno 6.12.2013]. Dostupné z: <http://www.jj-electronic.com/pdf/E88CC.pdf>
- [13] BELZA, J. Jednoduchý napájecí zdroj. Praktická elektronika A Radio. 1998, roč. 3, č. 11, s. 5. ISSN 1211-328.
- [14] Texas Instruments Inc. [on-line]. Datasheet LM317 – *3-Terminal Adjustable Regulator* [citováno 6.12.2013]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm117.pdf>
- [15] Texas Instruments Inc. [on-line]. Datasheet LM117HV/ LM317HV – *3-Terminal Adjustable Regulator* [citováno 6.12.2013]. Dostupné z:

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm117hv.pdf>

- [16] Nuvotem Talema [on-line]. Toroidal Transformers for Universal Application – *Power Transformers 1VA – 7,5kVA* [citováno 6.12.2013].
Dostupné z: http://www.soselectronic.cz/a_info/resource/a/pdf/TALEMA_2x115_70000K.pdf
- [17] Analog Device Inc. [on-line]. Datasheet SSM2019 – *Self-Contained Audio Preamplifier* [citováno 6.12.2013]. Dostupné z:
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/SSM2019.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

THD	Total Harmonic Distortion – celkové harmonické zkreslení
SNR	Signal to Noise Ratio, poměr signál/šum
SR	Slew Rate, doba přeběhu
RC	Typ filtru, obsahující odpor a kondenzátor
FET	Field Effect Transistor – tranzistor řízený elektrickým polem
JFET	Junction Gate FET
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor FET
PCB	Printed Circuit Board – deska plošných spojů
DPS	Deska plošných spojů
EMC	Electromagnetic Compatibility – elektromagnetická kompatibilita
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
OPA	Operational Amplifier
OZ	Operační zesilovač
A	Anode – anoda elektronky
K	Kathode – katoda elektronky
G	Grid – mřížka elektronky
TOP	Strana součástek na DPS
BOTTOM	Strana spojů na DPS
PWM	Pulse Width Modulation – pulzně šířková modulace
LED	Light Emitting Diode – světlo emitující dioda
CRT	Cathode Ray Tube – obrazovka s vakuovou elektronkou

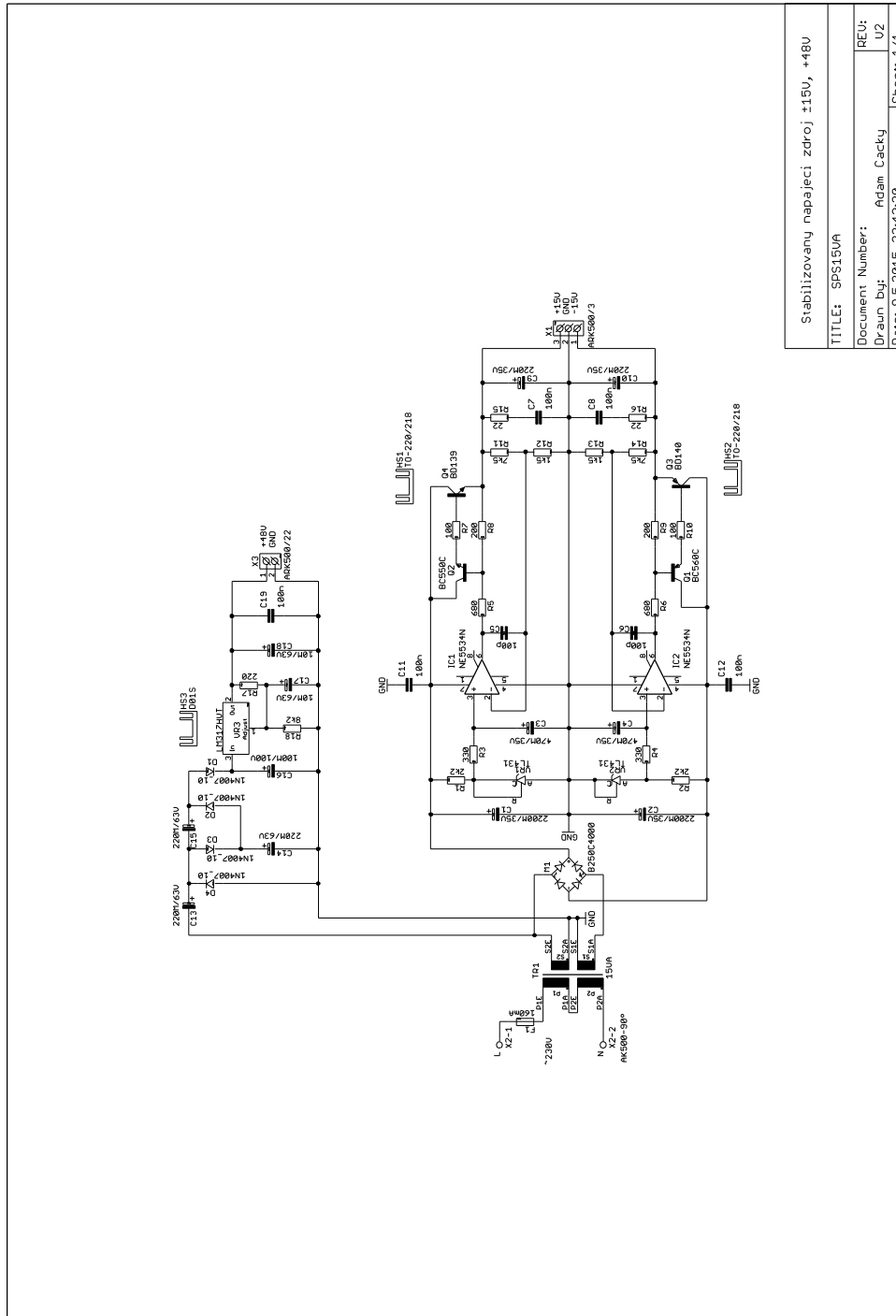
SEZNAM PŘÍLOH

A	Obvodová zapojení navrženého zařízení	56
A.1	Schéma zapojení stabilizovaného napájecího zdroje	56
A.2	Schéma zapojení stabilizovaného zdroje žhavení.....	57
A.3	Schéma zapojení mikrofonního předzesilovače.....	58
A.4	Schéma zapojení ovládacího panelu	59
A.5	Schéma zapojení patice elektronky.....	60
B	Návrh motivu plošného spoje	61
B.1	DPS stabilizovaného napájecího zdroje – strana spojů (bottom)	61
B.2	DPS stabilizovaného zdroje žhavení – strana spojů (bottom)....	62
B.3	DPS mikrofonního předzesilovače – strana spojů (bottom).....	63
B.4	DPS ovládacího panelu – strana spojů (bottom).....	64
B.5	DPS patice elektronky – strana spojů (bottom).....	64
C	Osazovací výkresy	65
C.1	Osazení stabilizovaného napájecího zdroje.....	65
C.2	Osazení stabilizovaného zdroje žhavení.....	66
C.3	Osazení mikrofonního předzesilovače	67
C.4	Osazení ovládacího panelu	68
C.5	Osazení patice elektronky	68
D	Seznam součástek	69
D.1	Seznam součástek stabilizovaného napájecího zdroje	69
D.2	Seznam součástek stabilizovaného zdroje žhavení.....	70
D.3	Seznam součástek mikrofonního předzesilovače.....	72
D.4	Seznam součástek ovládacího panelu	75
D.5	Seznam součástek patice elektronky.....	75
D.6	Seznam ostatních součástek	76
E	Fotodokumentace	77

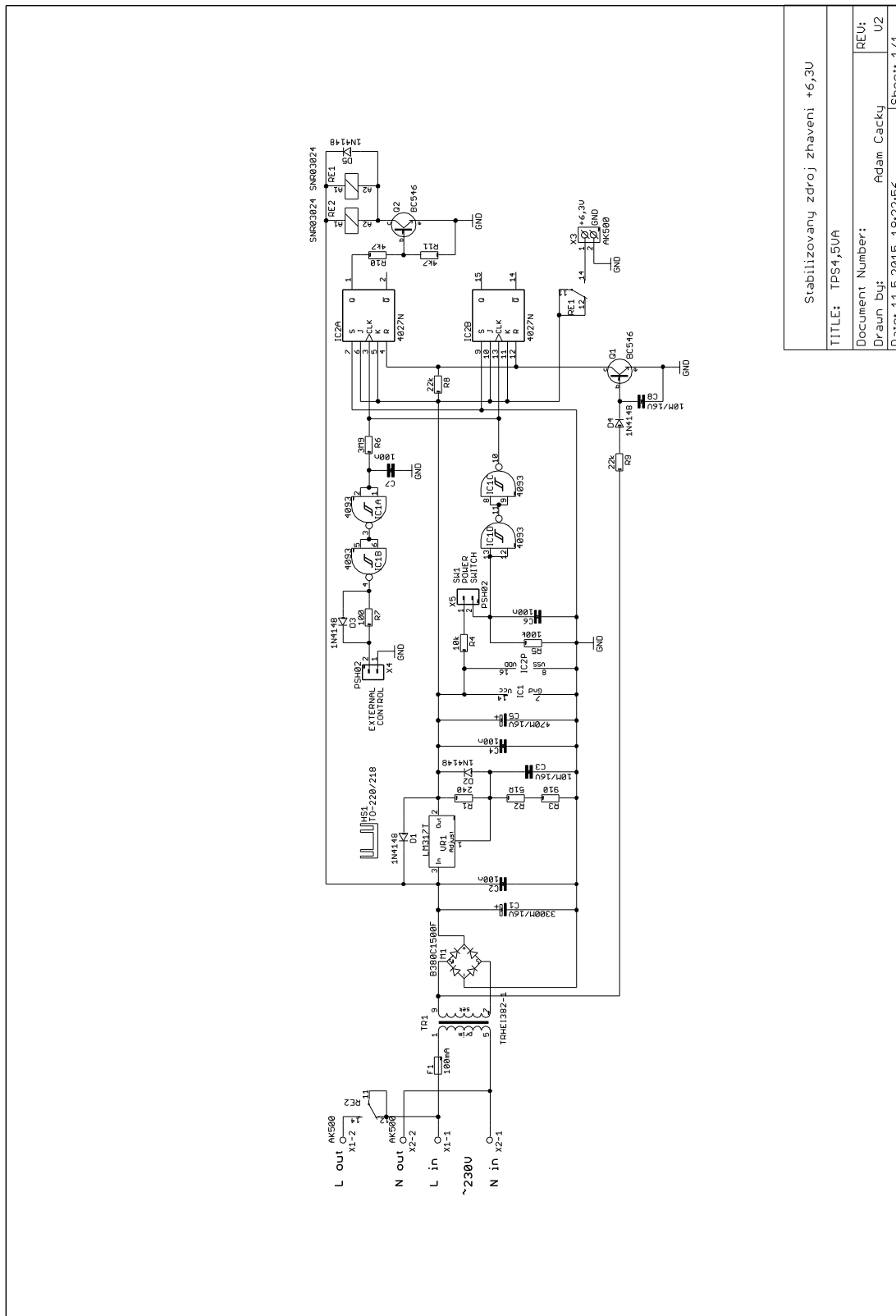
E.1	DPS – Stabilizovaný zdroj žhavení	77
E.2	DPS – Stabilizovaný napájecí zdroj	77
E.3	DPS – mikrofonní předzesilovač.....	78
E.4	Finální provedení navrženého zařízení	78
F	Obsah přiloženého CD	80

A OBVODOVÁ ZAPOJENÍ NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ

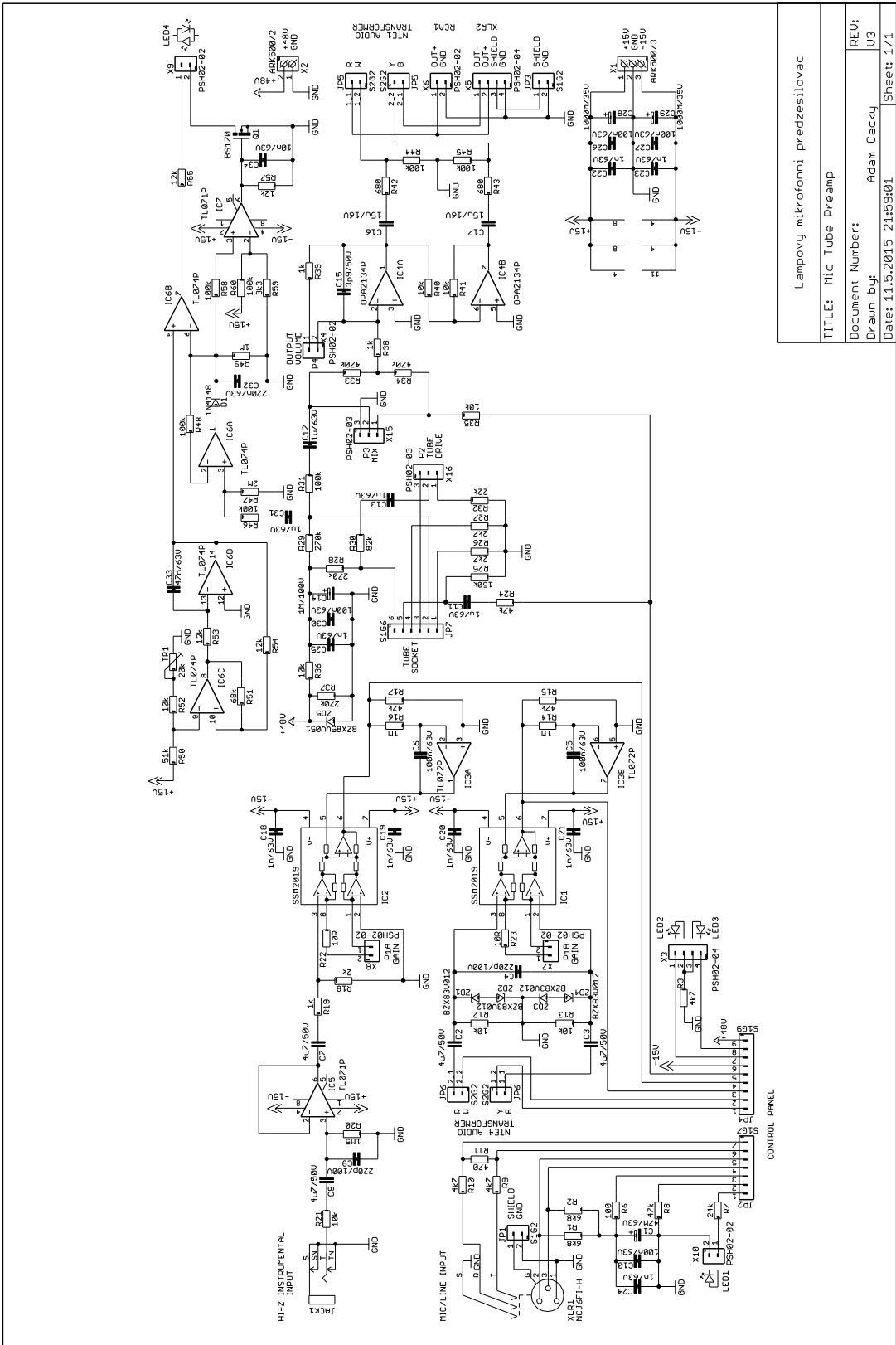
A.1 Schéma zapojení stabilizovaného napájecího zdroje



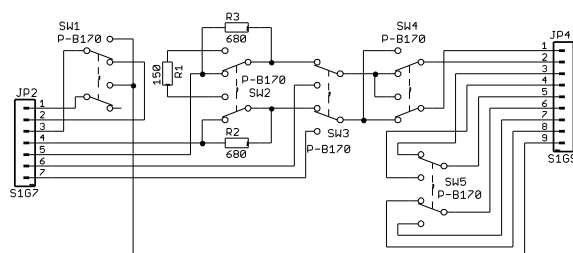
A.2 Schéma zapojení stabilizovaného zdroje žhavení



A.3 Schéma zapojení mikrofonního předzesilovače

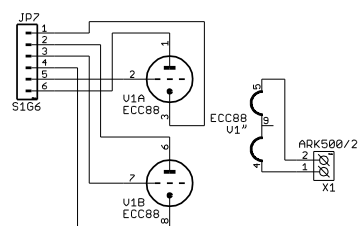


A.4 Schéma zapojení ovládacího panelu



Ovladaci panel	
TITLE: Control Panel	
Document Number:	REV:
Drawn by: Adam Cacky	V1
Date: 11.5.2015 19:41:53	Sheet: 1/1

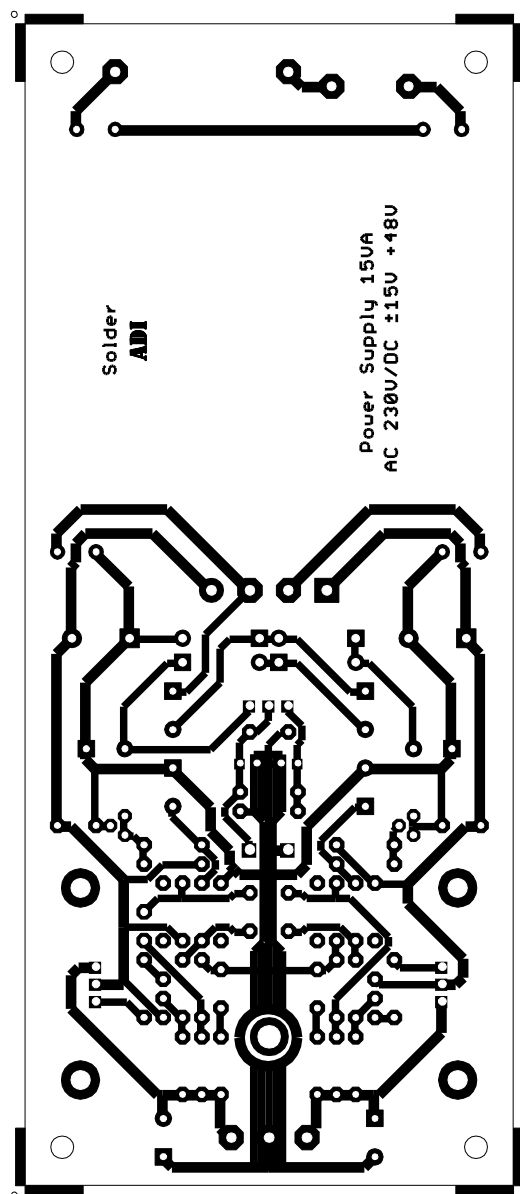
A.5 Schéma zapojení patice elektronky



Patice elektronky	
TITLE: Tube Socket	
Document Number:	REV:
Drawn by: Adam Cacky	U1
Date: 11.5.2015 18:57:26	Sheet: 1/1

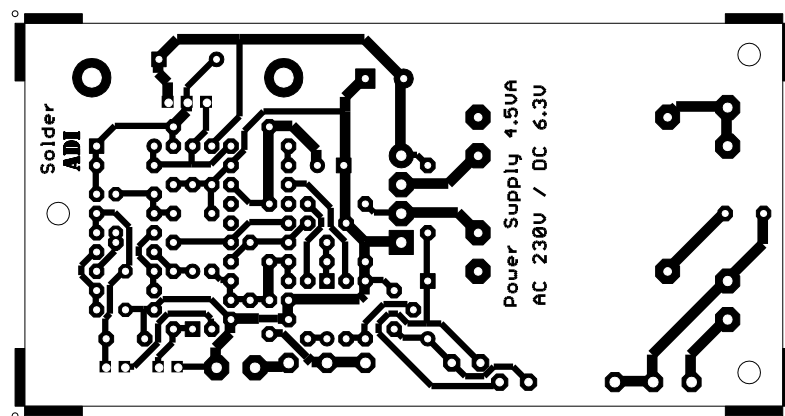
B NÁVRH MOTIVU PLOŠNÉHO SPOJE

B.1 DPS stabilizovaného napájecího zdroje – strana spojů (bottom)



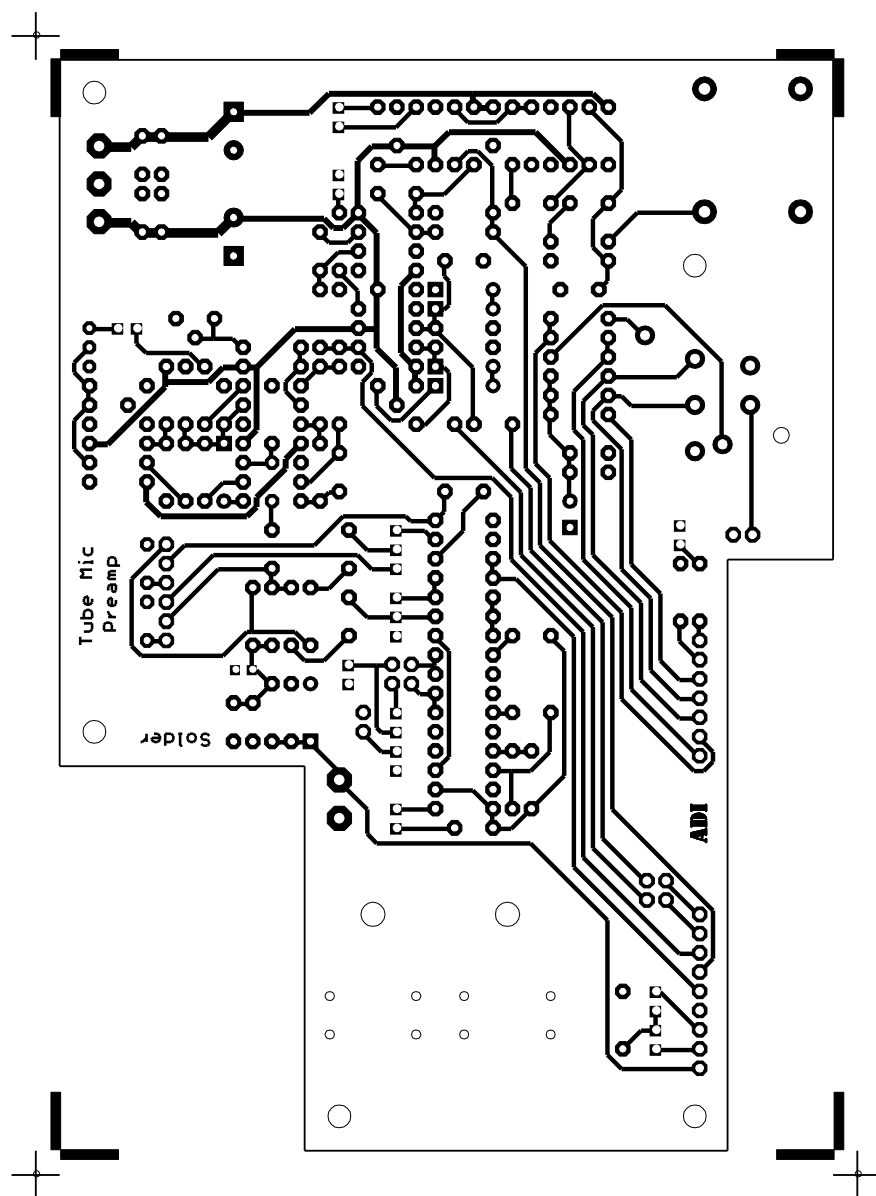
Rozměr desky 64,5 x 153,5 [mm], měřítko M1:1

B.2 DPS stabilizovaného zdroje žhavení – strana spojů (bottom)



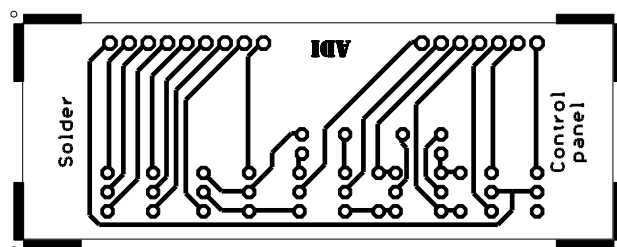
Rozměr desky 100,5 x 50,5 [mm], měřítko M1:1

B.3 DPS mikrofonního předzesilovače – strana spojů (bottom)



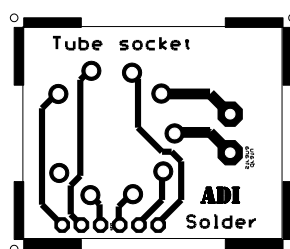
Rozměr desky 102,0 x 144,0 [mm], měřítko M1:1

B.4 DPS ovládacího panelu – strana spojů (bottom)



Rozměr desky 78,0 x 4,5 [mm], měřítko M1:1

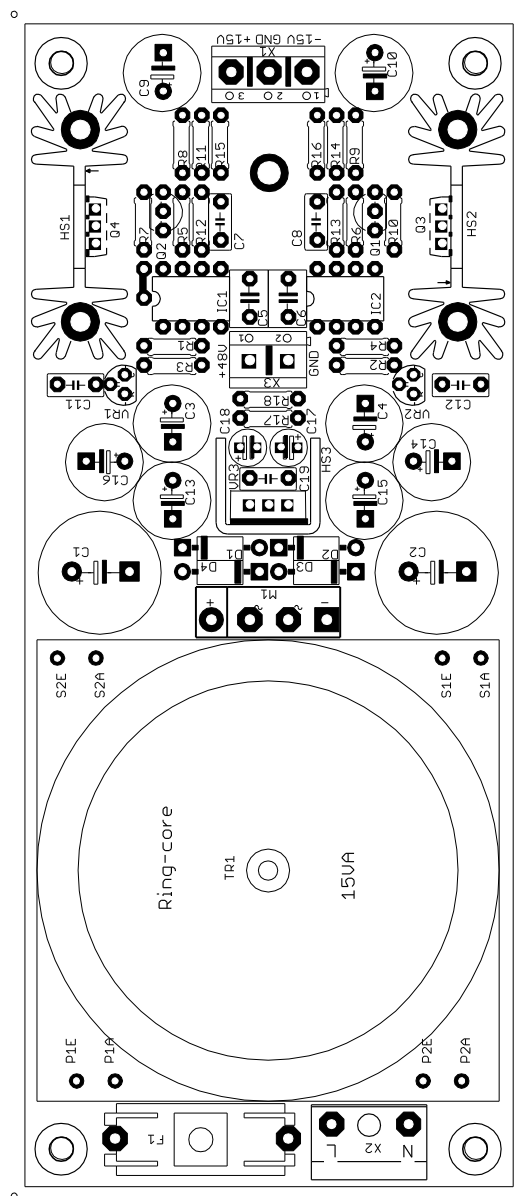
B.5 DPS patice elektronky – strana spojů (bottom)



Rozměr desky 34,5 x 28,0 [mm], měřítko M1:1

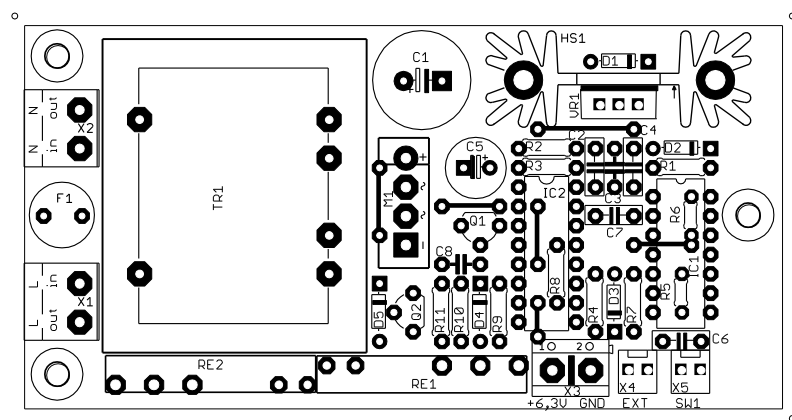
C OSAZOVACÍ VÝKRESY

C.1 Osazení stabilizovaného napájecího zdroje



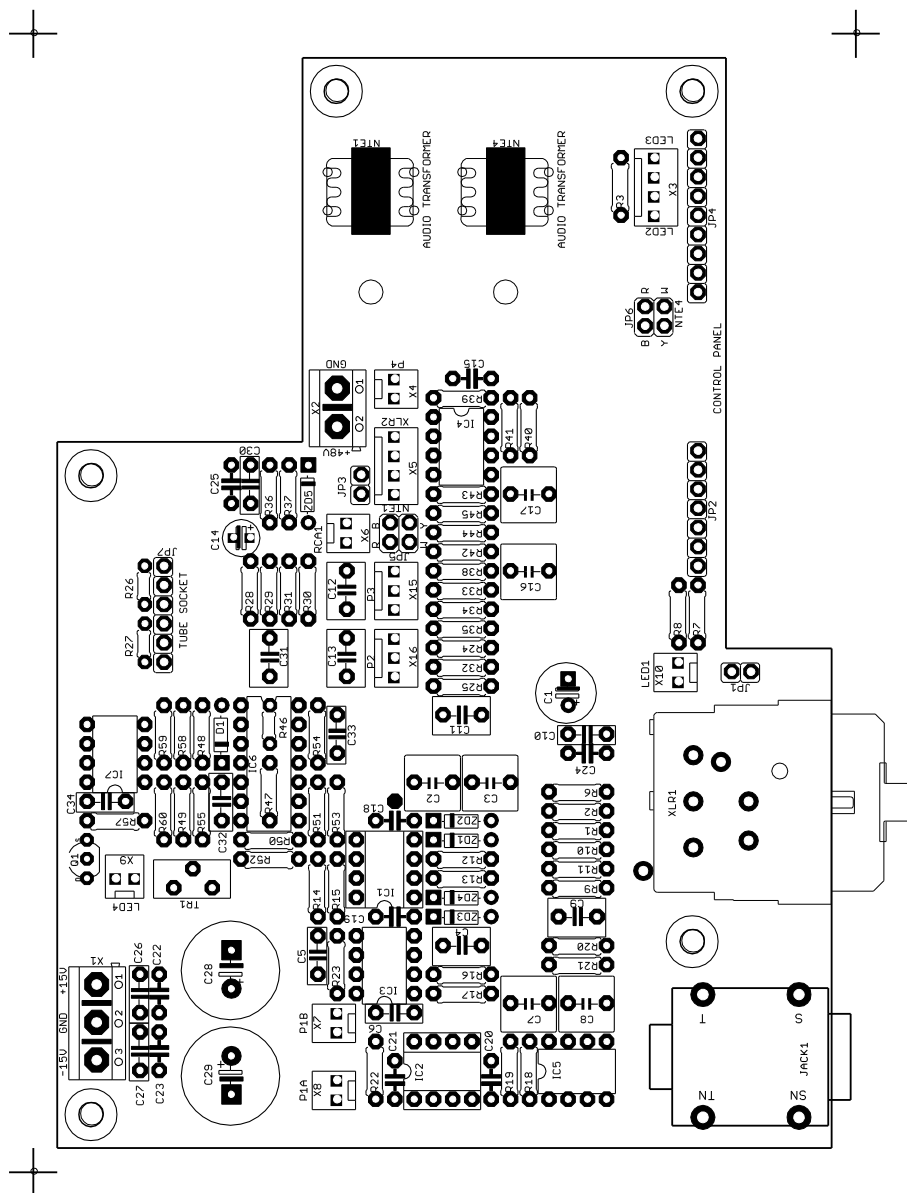
Rozměr desky 64,5 x 153,5 [mm], měřítko M1:1

C.2 Osazení stabilizovaného zdroje žhavení



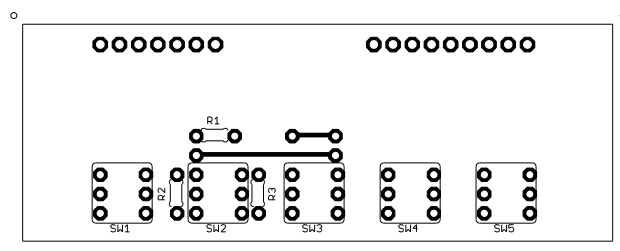
Rozměr desky 100,5 x 50,5 [mm], měřítko M1:1

C.3 Osazení mikrofonního předzesilovače



Rozměr desky 102,0 x 144,0 [mm], měřítko M1:1

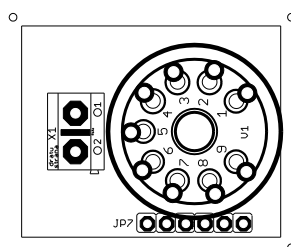
C.4 Osazení ovládacího panelu



Rozměr desky 78,0 x 4,5 [mm], měřítko M1:1

Pozn. součástky SW1 – SW5 osadit ze strany spojů (bottom)

C.5 Osazení patice elektronky



Rozměr desky 34,5 x 28,0 [mm], měřítko M1:1

D SEZNAM SOUČÁSTEK

D.1 Seznam součástek stabilizovaného napájecího zdroje

Č.	Počet	Označení	Hodnota	Typ	Rozteč /pouzdro	Popis
1	2	R1, R2	2k2		0204	Rezistor
2	2	R3, R4	330		0204	Rezistor
3	2	R5, R6	680		0204	Rezistor
4	2	R7, R10	100		0204	Rezistor
5	2	R8, R9	200		0204	Rezistor
6	2	R12, R13	1k5		0204	Rezistor
7	2	R11, R14	7k5		0204	Rezistor
8	2	R15, R16	22		0204	Rezistor
9	1	R18	8k2		0204	Rezistor
10	1	R17	220		0204	Rezistor
11	2	C5, C6	100p	FKP	RM5	Fóliový kondenzátor
12	5	C7, C8, C11, C12, C19	100n	MKS	RM5	Fóliový kondenzátor
13	2	C1, C2	2200u/35V	LXZ	RM7,5	Elektrolyt. kondenzátor
14	2	C3, C4	470u/35V	LXZ	RM5	Elektrolyt. kondenzátor
15	2	C9, C10	220u/35V	LXZ	RM5	Elektrolyt. kondenzátor
16	1	C16	100u/100V		RM5	Elektrolyt. kondenzátor
17	3	C13, C14, C15	220u/63V		RM5	Elektrolyt. kondenzátor
18	2	C17, C18	10u/63V	LXY	RM2	Elektrolyt. kondenzátor
19	1	F1	PTF15		SH22,5A	Držák pojistky
20	1	F1	BS140			Kryt pojistky
21	1	F1	160mA	T-slow	5x20	Pojistka trubičková
22	4	D1, D2, D3, D4	1N4007		DO41	Dioda
23	1	M1	B250C4000		19,5x16,5x16,3	Usměrňovací můstek

Č.	Počet	Označení	Hodnota	Typ	Rozteč /pouzdro	Popis
24	2	IC1, IC2	NE5534AP		DIL08	Operační zesilovač
25	2	IC1, IC2	DIL08		DIL08	Patice
26	1	Q1	BC560C	PNP	TO-92	PNP tranzistor
27	1	Q2	BC550C	NPN	TO-92	NPN tranzistor
28	1	Q3	BD140	PNP	TO-126	PNP tranzistor
29	1	Q4	BD139	NPN	TO-126	NPN tranzistor
30	2	VR1, VR2	TL431CLP		TO-92	Napěťová reference
31	1	VR3	LM317HVT		TO-220	Napěťový regulátor
32	2	HS1, HS2	SK104-25	elox	34,9x12,7x25,4	Chladič lisovaný
33	1	HS3	DO01A	elox	13x19x13	Chladič lisovaný
34	1	X1	AK500/3DS	3-pin	W237-03P	Svorkovnice horizontální
35	1	X2	AK500/3DS	2(3)-pin	W237-2N-90	Svorkovnice vertikální
36	1	X3	AK590/2DS	2-pin	W237-02P-45	Svorkovnice 45°
37	1	TR1	70053K/15VA	toroid	60x60x26,3	Transformátor toroidní

D.2 Seznam součástek stabilizovaného zdroje žhavení

Č.	Počet	Označení	Hodnota	Typ	Rozteč /pouzdro	Popis
1	1	R1	240		0204	Rezistor
2	1	R2	51R		0204	Rezistor
3	1	R3	910		0204	Rezistor
4	1	R4	10k		0204	Rezistor
5	1	R5	100k		0204	Rezistor
6	1	R6	3M9		0204	Rezistor
7	1	R7	100		0204	Rezistor
8	2	R8, R9	22k		0204	Rezistor
9	2	R10, R11	4k7		0204	Rezistor
10	1	C1	3300u/16V	KZM	RM5	Elektrolyt. kondenzátor

Č.	Počet	Označení	Hodnota	Typ	Rozteč /pouzdro	Popis
11	4	C2, C4, C6, C7	100n	MKS	RM5	Fóliový kondenzátor
12	2	C3, C8	10u/16V	C	RM5	Tantalový kondenzátor
13	1	C5	470u/16V	LXZ	RM3,5	Elektrolyt. kondenzátor
14	5	D1-D5	1N4148		DO35	Dioda
15	1	M1	B380C1500F		15,24x5x14,4	Usměrňovací můstek
16	1	IC1	CD4093		DIP14	Integrovaný obvod
17	1	IC2	CD4027		DIP16	Integrovaný obvod
18	1	IC1	DIL14		DIL14	Patice
19	1	IC2	DIL16		DIL16	Patice
20	2	Q1, Q2	BC546B	NPN	TO-92	NPN tranzistor
21	1	VR1	LM317T		TO-220	Napěťový regulátor
22	1	F1	0034.6705	T-slow	8,5x8,5	Pojistka radiální
23	2	RE1, RE2	34.51.7.012.0010	SPDT	25x5x15	Elmag. relé
24	1	TR1	TRHEI382-1x9	EI 38	40,8x35x28,1	Transformátor
25	1	HS1	SK104-25	elox	34,9x12,7x25,4	Chladič lisovaný
26	2	X1, X2	AK500/2DS	2-pin	W237-02P-90	Svorkovnice vertikální
27	1	X3	AK500/2DS	2-pin	W237-02P	Svorkovnice horizontální
28	2	X4, X5	PSH02-02PG	2-pin	RM2,54	Konektor se zámkem
29	2	X4, X5	PFH02-02P	2-pin		Konektorové pouzdro
30	1	SW1	HBGQ12F- 10E/G/12V/N	panel	ø12	Hl. spínač podsvětlený

D.3 Seznam součástek mikrofonního předzesilovače

Č.	Počet	Označení	Hodnota	Typ	Rozteč /pouzdro	Popis
1	2	R1, R2	6k8		0204	Rezistor
2	3	R3, R9, R10	4k7		0204	Rezistor
3	1	R6	100		0204	Rezistor
4	1	R7	24k		0204	Rezistor
5	4	R8, R15, R17, R24	47k		0204	Rezistor
6	1	R11	470		0204	Rezistor
7	8	R12, R13, R21, R35, R36, R40, R41, R52	10k		0204	Rezistor
8	3	R14, R16, R49	1M		0204	Rezistor
9	1	R18	2k		0204	Rezistor
10	3	R19, R38, R39	1k		0204	Rezistor
11	1	R20	1M5		0204	Rezistor
12	2	R22, R23	10R		0204	Rezistor
13	1	R25	150k		0204	Rezistor
14	2	R26, R27	2k7		0204	Rezistor
15	3	R28, R29, R37	270k		0204	Rezistor
16	1	R30	82k		0204	Rezistor
17	7	R31, R44, R45, R46, R48, R58, R60	100k		0204	Rezistor
18	1	R32	22k		0204	Rezistor
19	2	R33, R34	470k		0204	Rezistor
20	2	R42, R43	680		0204	Rezistor
21	1	R47	2M		0204	Rezistor
22	1	R50	51k		0204	Rezistor
23	1	R51	68k		0204	Rezistor
24	4	R53, R54, R55, R57	12k		0204	Rezistor
25	1	R59	3k3		0204	Rezistor
26	1	C1	47u/63V	LXY	RM3,5	Elektrolyt. kondenzátor
27	4	C2, C3, C7, C8	4u7/50V	MKS	RM5	Fóliový kondenzátor

Č.	Počet	Označení	Hodnota	Typ	Rozteč /pouzdro	Popis
28	2	C4, C9	220p/100V	FKP	RM5	Fóliový kondenzátor
29	6	C5, C6, C10, C26, C27, C30	100n/63V	MKS	RM5	Fóliový kondenzátor
30	4	C11, C12, C13, C31	1u/63V	MKS	RM5	Fóliový kondenzátor
31	1	C14	1u/100V	KMG	RM2,5	Elektrolyt. kondenzátor
32	1	C15	3p9/50V	NPO	RM5	Keramický kondenzátor
33	2	C16, C17	15u/16V	MKS	RM5	Fóliový kondenzátor
34	8	C18-C25	1n/63V	NPO	RM5	Keramický kondenzátor
35	2	C28, C29	1000u/35V	LXZ	RM5	Elektrolyt. kondenzátor
36	1	C32	220n/63V	MKS	RM5	Fóliový kondenzátor
37	1	C33	47n/63V	MKS	RM5	Fóliový kondenzátor
38	1	C34	10n/63V	MKS	RM5	Fóliový kondenzátor
39	1	D1	1N4148		DO35	Dioda
40	4	ZD1-ZD4	BZX83V012	12V	DO35	Zenerova dioda
41	1	ZD5	BZX83V051	51V	DO35	Zenerova dioda
42	1	Q1	BS170	N- kanál	TO-92	Unipolární tranzistor
43	2	IC1, IC2	SSM2019	Audio	DIL08	Operační zesilovač
44	1	IC3	TL072P	J-FET	DIL08	Operační zesilovač
45	1	IC4	OPA2134P	Audio	DIL08	Operační zesilovač
46	2	IC5, IC7	TL071P	J-FET	DIL08	Operační zesilovač
47	6	IC1-IC5, IC7	DIL08		DIL08	Patice
48	1	IC6	TL074P	J-FET	DIL14	Operační zesilovač
49	1	IC6	DIL14		DIL14	Patice
50	1	TR1	20k	25-turn	64Y	Trimr
51	1	P1	5k/lin	stereo	1622NK	Potenciometr

Č.	Počet	Označení	Hodnota	Typ	Rozteč /pouzdro	Popis
52	1	P2	10k/lin	mono	1621NB	Potenciometr
53	1	P3	100k/lin	mono	1621NB	Potenciometr
54	1	P4	100k/log	mono	1621NA	Potenciometr
55	1	JACK1	NMJ4HFD2	1/4"		Mono Jack konektor
56	1	XLR1	NCJ6FI-H	combo		XLR - Jack konektor
57	1	XLR2	NC3MD-L-B-1	panel		XLR panelový konektor
58	1	RCA1	NF2D-B-2	panel		RCA panelový konektor
59	1	X1	AK500/3DS	3-pin	W237-03P	Svorkovnice horizontální
60	1	X2	AK500/2DS	2-pin	W237-02P	Svorkovnice horizontální
61	2	X3, X5	PSH02-04PG	4-pin	RM2,54	Konektor se zámkem
62	2	X3, X5	PFH02-04P	4-pin	RM2,54	Konektorové pouzdro
63	6	X4, X6, X7, X8, X9, X10	PSH02-02PG	2-pin	RM2,54	Konektor se zámkem
64	6	X4, X6, X7, X8, X9, X10	PFH02-02P	2-pin	RM2,54	Konektorové pouzdro
65	2	X15, X16	PSH02-03PG	3-pin	RM2,54	Konektor se zámkem
66	2	X15, X16	PFH02-03P	3-pin	RM2,54	Konektorové pouzdro
67	2	JP1, JP3	S1G2	2-pin	RM2,54	Kolíková lišta přímá
68	1	JP2	S1G7W	7-pin	RM2,54	Kolíková lišta 90°
69	1	JP4	S1G9W	9-pin	RM2,54	Kolíková lišta 90°
70	2	JP5, JP6	S2G4	2x2-pin	RM2,54	Kolíková lišta přímá
71	1	JP7	S1G6W	6-pin	RM2,54	Kolíková lišta 90°
72	6	JUMPERS	JUMP-SW		RM2,54	Zkratovací propojka
73	1	NTE1	NTE-1	1:1		Audio transformátor

Č.	Počet	Označení	Hodnota	Typ	Rozteč /pouzdro	Popis
74	2	NTE1	BLS02	2-pin	RM2,54	Konektorové pouzdro
75	1	NTE4	NTE-4	1:4		Audio transformátor
76	2	NTE4	BLS02	2-pin	RM2,54	Konektorové pouzdro
77	2	LED2, LED3	L-13GD	zelená	ø2	LED dioda
78	1	LED1	L-13ID	červená	ø2	LED dioda
79	1	LED4	BL-XD0	bipol. RYG	ø3	LED dioda

D.4 Seznam součástek ovládacího panelu

Č.	Počet	Označení	Hodnota	Typ	Rozteč /pouzdro	Popis
1	1	R1	150		0204	Rezistor
2	2	R2, R3	680		0204	Rezistor
3	5	SW1-SW5	P-B170	ON- ON		Tlačítkový spínač
4	1	SW1-SW5	SPL30	30-pin	RM2,54	Dutinková lišta precizní

D.5 Seznam součástek patice elektronky

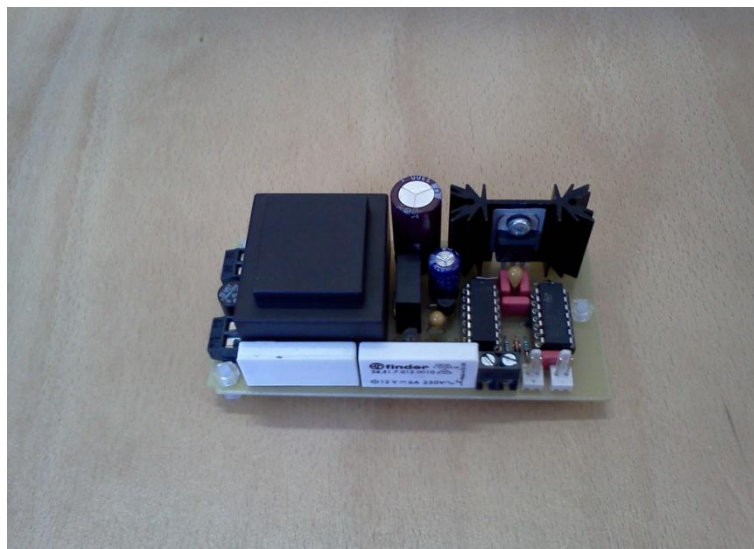
Č.	Počet	Označení	Hodnota	Typ	Rozteč /pouzdro	Popis
1	1	V1	ECC88	trioda	NOVAL	Elektronka
2	1	V1	SK9-CD	9-pin	NOVAL	Patice elektronková
3	1	X1	AK500/2DS	2-pin	W237-02P	Svorkovnice horizontální

D.6 Seznam ostatních součástí

Č.	Počet	Označení	Typ	Rozměry	Popis
1	1	Skříň	Galaxy 1GX247	230x170x40mm	Přístrojová skříň 1U
2	3	Knoflík pro P1, P2, P3	CS216- HL16A2Dh	ø16mm, hřídel ø6,35mm	Knoflík potenciometru
3	1	Knoflík pro P4	CS216- HL28A2Dh	ø28mm, hřídel ø6,35mm	Knoflík potenciometru
4	5	Hmatník pro SW1-SW5	2P1-2TB- B201A-Z	ø7mm	Hmatník spínače
5	1	AC konektor, AC vypínač	GSW1074		Síťový konektor s vypínačem
6	3	Faston pro AC konektor	FS7048-BS	6,3mm	Faston na kabel
7	3	Krytka	66332-F	6,3mm	Krytka na faston
8	2	Faston pro AC vypínač	FS70218-BS	4,8mm	Faston na kabel
9	2	Krytka	64832-F	4,8mm	Krytka na faston
10	1	Očko pro PE kontakt skříně	RL04470	ø3,2mm	Kabelové očko
11	7	Sloupek pro upevnění DPS zdrojů	KDA6M3X06 W	6mm, M3	Distanční sloupek plastový
12	7	Matice ke sloupku	SKP-M03P	M3	Plastová matice
13	5	Sloupek pro upevnění DPS předzesilovače	KDR04	4mm, ø3,6mm	Distanční sloupek plastový trubičkový
14	8	Kontakt pro konektor BLS	BLS CONTACT		Kontakt konektoru
15	28	Kontakt pro konektor PFH	PFF02-01FG		Kontakt konektoru
16	-	Bužírka vinutá			
17	-	Spojovací materiál			
18	-	Propojovací vodiče			

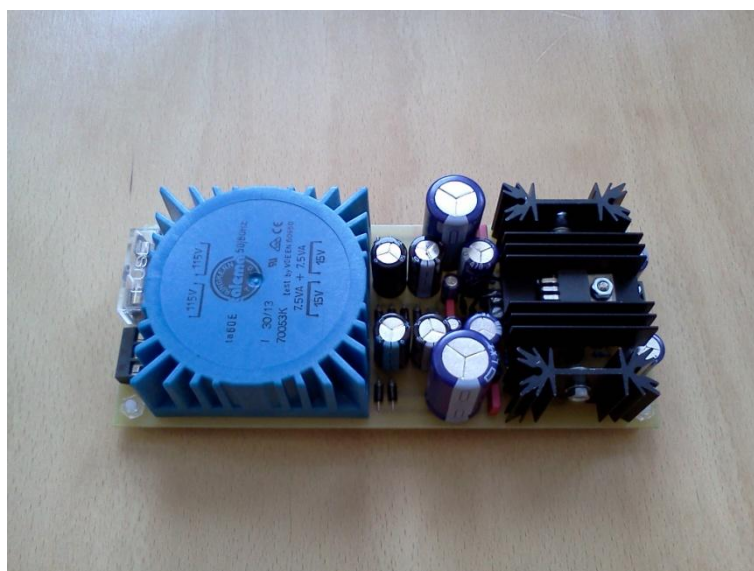
E FOTODOKUMENTACE

E.1 DPS – Stabilizovaný zdroj žhavení



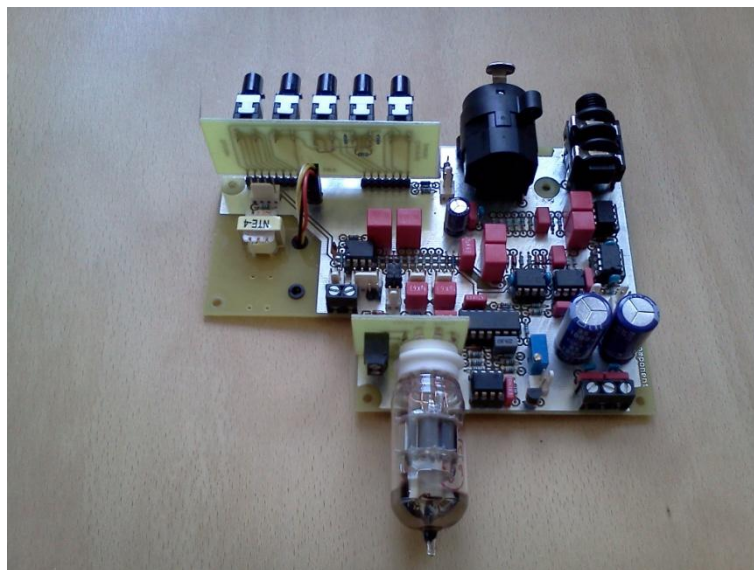
Obr. 36 Osazená DPS stabilizovaného zdroje žhavení

E.2 DPS – Stabilizovaný napájecí zdroj



Obr. 37 Osazená DPS stabilizovaného napájecího zdroje

E.3 DPS – mikrofonní předzesilovač



Obr. 38 Osazená DPS mikrofonního předzesilovače včetně osazeného ovládacího panelu a patice elektronky

E.4 Finální provedení navrženého zařízení



Obr. 39 Čelní pohled na přístrojovou skříň předzesilovače








Obr. 40 Zadní pohled na přístrojovou skříň předzesilovače



Obr. 41 Vnitřní pohled do přístrojové skříně předzesilovače

F OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

 CD Diplomová práce – Adam Čacký

-  Hlavní dokument DP ve formátu pdf
-  Výrobní podklady DPS ve formátu Eagle 5.11
-  Soubory obvodových simulací ve formátu OrCAD PSpice 16.0
-  Použité elektronické zdroje